



СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
Российской Академии Наук



XII Всероссийская научная конференция

«СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА»

Сборник научных трудов

2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА

Сборник научных трудов
XII Всероссийской научной конференции
п. Нижний Архыз 23–29 сентября 2024 г.

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2024

УДК 681.51.033(06)

ББК 32.965

C34

C34 Системный синтез и прикладная синергетика : сборник научных трудов XII Всероссийской научной конференции (п. Нижний Архыз, Россия 23–29 сентября 2024 г.) ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2024. – 448 с.

ISBN 978-5-9275-4838-5

В сборник включены доклады, представленные в рамках XII-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (CCPC-2024). Основными направлениями работы конференции являются: проблемы самоорганизации и управления в сложных технических системах; интеллектуальная обработка информации; информационная безопасность; искусственный интеллект в управлении: теория и практика; управление системами с распределенными параметрами; математическое моделирование в астрофизике, геофизике и инженерных науках; проблемы математического моделирования и управления в области медицины; беспилотные автоматизированные системы; современные образовательные технологии в области подготовки инженерных кадров.

Сборник трудов адресуется научным сотрудникам, преподавателям университетов, аспирантам и магистрантам, интересующимся междисциплинарными нелинейными проблемами прикладной синергетики, системного синтеза, науки управления и обработки информации.

Публикуется в авторской редакции.

УДК 681.51.033(06)

ББК32.965

ISBN 978-5-9275-4838-5

© Южный федеральный университет, 2024

**Организационный комитет XII Всероссийской научной конференции
«Системный синтез и прикладная синергетика»**

Сопредседатели:

Власюк В.В., Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук;

Шевченко И.К., Южный федеральный университет;

Шелудько В.Н., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Члены организационного комитета:

Веселов Г.Е., Южный федеральный университет;

Доргушаова А.К., Майкопский государственный технологический университет;

Заковоротный В.Л., Донской государственный технический университет;

Кайсина Е.И., Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук;

Ляпунцова Е.В., Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана;

Першин И.М., Северо-Кавказский федеральный университет;

Петренко В.И., Северо-Кавказский федеральный университет;

Рапопорт Э.Я., Самарский государственный технический университет.

**Программный комитет XII Всероссийской научной конференции
«Системный синтез и прикладная синергетика»**

Почетный председатель:

Балега Ю.Ю., Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук.

Сопредседатели:

Веселов Г.Е., Южный федеральный университет;

Желенкова О.П., Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук;

Першин И.М., Северо-Кавказский федеральный университет;

Шестopalов М.Ю., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Зам. председателя:

Самойлов А.Н., Южный федеральный университет;

Члены программного комитета:

Абрамов Е.С., Южный федеральный университет;

Аджиев А.Х., Высокогорный геофизический институт;

Ачарова И.А., Южный федеральный университет.

Воробьев Е.Г., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

Горбунов А.В., Южный федеральный университет;

Дилигенская А.Н., Самарский государственный технический университет;

Душин С.Е., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);

Ищукова Е.А., Южный федеральный университет;

Куповых Г.В., Южный федеральный университет;

Линец Г.И., Северо-Кавказский федеральный университет;

Лукьянов А.Д., Донской государственный технический университет;

Лызь Н.А., Южный федеральный университет;

Мещеряков Р.В., Институт проблем управления РАН;

Первухин Д.А., Санкт-Петербургский горный университет;

Попов А.Н., Южный федеральный университет;

Тебуева Ф.Б., Северо-Кавказский федеральный университет;

Тищенко Е.Н., Ростовский государственный экономический университет (РИНХ);

Целых А.А., Южный федеральный университет;

Чернышев А.Б., Северо-Кавказский федеральный университет;

Щукин Г.Г., Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Секция I. ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Попов А.Н.	
Синергетический синтез адаптивных регуляторов электромеханических систем	10
Андреев А.В., Грудяева Е.С., Душин С.Е.	
Исследование управления процессами биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ Агро»	18
Коргин Н.А., Мещеряков Р.В., Верич Ю.Б.	
Проект по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях, проблемы и перспективы реализации на примере САО РАН.....	26
Ковалёв Д.А., Русинов Л.А., Куркина В.В., Вакуленко Д.Ю.	
Сравнительный анализ характеристик мониторинга технологического процесса с использованием линейного и нелинейного метода главных компонент	32
Светлов М.С., Львов П.А., Шаронов П.А., Балабан О.М., Мартиросян Д.М., Мартиросян А.М.	
Интервальные методы в системах управления с пьезоэлектрическим приводом и обратной связью по выходу	37
Григорьев В.В., Мансурова О.К., Васильев А.Е.	
Обобщенный регулятор со встроенными моделями.....	43
Куркина В.В., Ковалёв Д.А., Русинов Л.А. Колпащикова А.П.	
Контроль и повышение достоверности результатов хроматографического анализа	47
Скляров С.А., Веселов Г.Е.	
Проектирование алгоритмов управления распределением энергии в Smart Grid с использованием синергетического подхода	53
Светлов М.С., Львов А.А., Багаев И.С., Мартиросян Д.М., Мартиросян А.М., Хасанов С.Т.	
Оценка помехоустойчивости информационных каналов при случайных импульсных помехах	59
Лившиц М.Ю., Тупоносова Е.П., Еремеева А.А.	
Регрессионные и корреляционные модели для принятия управленческих кадровых решений сложноструктурированной промышленной компанией	65
Соловьев И.Г., Баландин М.С., Говорков Д.А.	
Влияние желаемой производительности на выбор режима периодической эксплуатации.....	70
Олейников К.А.	
Синергетический синтез алгоритмов управления движением автомобиля	75
Лапик О.И., Соловьев И.Г.	
Алгоритм программного управления для нефтяной скважины с частотно-регулируемым ЭЦН в условиях неопределенности	79

Алмаз А.А.

Следящий регулятор для системы управления опорно-поворотным устройством оптического телескопа	84
---	----

Колмакова Д.А., Яромич Е.А.

Решение проблемы планирования и прогнозирования технического состояния транспорта специального назначения	90
---	----

Секция II. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Гладков Л.А., Гладкова Н.В.

Генетические алгоритмы: проблемы и перспективы.....	95
---	----

Полунин Ю.А.

Анализ динамики выручки и структурных изменений стабильных российских компаний	103
--	-----

Буренева О.И., Миронов С.Э.

Умножители для ускорителей искусственных нейронных сетей.....	110
---	-----

Родзин С.И.

Вычислительная модель и биоэвристика коллективного поведения агентов.....	117
---	-----

Шпаковская И.И., Мэлдо А.А., Сидорина Д.А., Кузнецов Е.М., Дора С.В.

Междисциплинарная коммуникация и ее роль в применении искусственного интеллекта в медицинской отрасли.....	122
--	-----

Власенко С.В.

Автоматизация синтеза моделей знаний на основе концептуальных графов с применением технологий машинного обучения	128
--	-----

Ковалёв Д.А., Бахтин А.В.

Система машинного зрения для определения степени загрузки шахты цепного дефибрера.....	135
--	-----

Мутанна Мохаммед Салех Али, Целых А.А.

Интеллектуальная разгрузка вычислений в сетях LoRaWAN для промышленного интернета вещей с использованием мягкого алгоритма «Актор-Критик».....	138
--	-----

Ковалев В.В., Сергеев Н.Е.

Построение системы поиска и распознавания объектов на изображениях для устройств с ограниченным вычислительным ресурсом	144
---	-----

Вагизов М.Р., Витлев К.А., Челпанов В.С.

Разработка отечественной интеллектуальной геоинформационной системы	150
---	-----

Мнухин В.Б.

О восстановлении орбит по переключениям.....	153
--	-----

Сидельников В.И., Волерт А.В., Кошкаров А.В.

Разработка системы мониторинга сточных вод с использованием нейросетевых технологий	160
---	-----

Гушанский С.М., Потапов В.С., Поленов М.Ю.

Разработка и исследование квантовой нейронной сети для сжатия и реконструкции изображений	162
---	-----

Кутковой В.С., Елькин Д.М.	
Разработка программно-аппаратного комплекса для мониторинга наполнения мусорных контейнеров	168
Исаев А.В.	
Обзор методов выявления экспертных знаний для решения задач ситуационного анализа в ГИС	176
Кутковой В.С., Алмаз А.А.	
Разработка программно-аппаратного комплекса для обеспечения стабильного Интернет-соединения в движущемся транспорте	182
Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Аджиев А.Х, Гридинев К.А.	
Анализ грозовой активности на территории Северного Кавказа: возможности технологий искусственного интеллекта.....	189
Зяблова Е.Р., Боваев А.Б., Литвиненко В.Н.	
Особенности разработки программного модуля динамической визуализации графовой модели.....	193
Козловский А.В	
Организация распределенной обработки информации при формировании составных изображений	197

**Секция III. УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Першин И.М., Цаплева В.В., Антонов В.Ф.	
Исследование процессов обработки информации одномерным распределенным сканером	201
Бахтин А.В., Слюта М.О.	
Исследование современных проблем управления качеством бумаги по ширине полотна	208
Лившиц М.Ю., Бородулин Б.Б., Нигматуллин Р.М.	
Алгоритмы автоматического и оптимального управления температурным режимом несущих конструкций мобильного объекта	214
Мясникова Е.В., Чернышев А.Б., Майрансаев З.Р.	
Преобразование структуры нелинейной распределенной системы для применения обобщенных критериев устойчивости	221
Бондин И.А., Снурицын Г.К.	
Системный анализ процессов в гидролитосфере Ессентукского месторождения минеральных подземных вод	224
Георгиева М.А.	
Методы исследования эрозионно–русловых процессов	231

**Секция IV. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В АСТРОФИЗИКЕ, ГЕОФИЗИКЕ
И ИНЖЕНЕРНЫХ НАУКАХ**

Шалдырван И.В., Комаров В.В., Фокин М.Ю.

- Статистические оценки астрономической видимости IP-подсмотра по Полярной звезде 236

Первухин Д.А.

- Методы оценки координат и параметров движущихся объектов по пеленговой информации с подвижного носителя морского базирования 240

Комаров В.В., Шалдырван И.В., Фокин М.Ю.

- Сравнительный анализ систем ночного и дневного видения в САО РАН 248

Тимошенко Д.В., Куповых Г.В., Белоусова О.В., Кудринская Т.В.

- Оценка мощности локальных токовых генераторов в приземном слое атмосферы 255

Илюхин А.А., Клово А.Г.

- Новый алгоритм приведения двумерного уравнения эллиптического типа к каноническому виду 258

Клово А.Г., Куповых Г.В.

- Управление неоднородной струной 262

Тимошенко Д.В., Куповых Г.В., Белоусова О.В., Кудринская Т.В.

- Оценка мощности глобального грозового генератора 266

Илюхин А.А., Тимошенко Д.В.

- Управление конформациями молекул ДНК с помощью геометрических и физических параметров 268

Бугаева И.А., Никитина А.В.

- Математическая модель распределения власти на примере г. Таганрога 271

Семенистый В.В., Гамолина И.Э.

- Решение задачи обтекания тела сложной геометрии, моделирующей несущую поверхность типового высокоскоростного летательного аппарата на системах с распределенной памятью 278

**Секция V. ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И УПРАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ МЕДИЦИНЫ**

Графина О.А., Душин С.Е., Мелдо А.А.

- Математическое моделирование управляемого роста опухолевых клеток в процессе персонализированного лечения 282

Куцало А.Л., Чиков А.Е., Стаськова А.Р., Шпаковская И.И.

- Разработка модели определения порога анаэробного на основе неполного нагрузочного тестирования 289

Байбурин В.Б., Мещанов В.П., Дорошенко В.М.

- Применение СВЧ-излучения для деконтаминации инструментов хирургического, стоматологического и косметологического назначения 295

Пономарев Н.А., Мелдо А.А.

- Методы машинного обучения в радиомном анализе рака лёгкого. Перспективы и ограничения 300

Иванов С.К., Душин С.Е.

Математическое моделирование роста злокачественных новообразований и
разработка концепции предопухолевого состояния 306

Писарев А.С., Писарев И.А., Котова Е.Е.

Задача автоматической классификации сегментов в изображениях..... 312

Бершова А.С.

Когнитивный аспект самоорганизации личности в спортивном экстриме 317

Секция VI. БЕСПИЛОТНЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Попов И.А.

Синергетический синтез законов адаптивного управления самолетом-амфибией при
заборе воды на режиме глиссирования 323

Тур А.А., Веселов Г.Е.

Синергетический синтез системы управления продольным движением
самолета-амфибии Бе-200 в режиме сброса воды при тушении пожара..... 330

Веселов Г.Е., Лихтин С.С.

Проблема управления манипуляторами на БПЛА мультироторного типа 336

Белоусова О.В., Белоусов Ю.Б., Гривцов В.В.

Результаты компьютерного моделирования продольного движения самолета
с использованием модели плоской земли в стартовой системе координат..... 342

Вахрушев Д.Е., Веселов Г.Е.

Повышение качества навигации БПЛА с использованием оптического потока 346

Костоглотов А.А., Михайлов Г.Г., Оробинская В.Н.

Сравнительный анализ преимуществ протоколов управления беспилотными
летательными аппаратами 352

Маркова Д.К., Басан Е.С., Вахрушев Д.Е.

Девятиосевая система ориентации в пространстве для повышения стабильности
позиционирования..... 357

Напалкин М.Ю.

Анализ применения FPV-дронов: проблемы 360

Секция VII. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Добриков Ю.С., Котов Д.В., Лебедев О.Б.

Повышение кибербезопасности с помощью искусственного интеллекта..... 366

Басан Е.С., Могильный А.Б., Михайлова В.Д., Басан А.С.

Методика обнаружения аномальной работы киберфизических систем 372

Ермаков А.С.

Обеспечение защищенного удаленного администрирования информационных
систем и объектов критической информационной инфраструктуры..... 379

Басан Е.С., Быстрая З.А., Могильный А.Б., Лесников А.А., Шулика М.Г.

Разработка структуры описания инцидентов безопасности для киберфизических
систем 386

Абрамов Е.С., Белов Н.Е.

Классификация и оценка качества источников индикаторов компрометации 392

**Секция VIII. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ**

Имаев Д.Х., Немудрук М.Л., Федоров М.С., Шестопалов М.Ю., Щуров Д.А.

От объекта до системы управления. Подготовка инженерных кадров..... 396

Непомнящий А.В.

Проблема самоорганизации человекоразмерных систем: пост-неклассический
взгляд 404

Лызь Н.А., Лызь А.Е.

Факторы результативности высшего образования и управление ими в подготовке
ИТ-специалистов 411

Эксакусто Т.В., Кибальченко И.А.

Интеллектуально-творческие способности студентов: особенности и технологии
развития 418

Котова Е.Е.

Представление методов eXplainable Artificial Intelligence в структуре онтологии
для применения в образовательном процессе 425

Истратова О.Н.

Образовательный опыт студентов как субъектов профессионального выбора 432

Быкансова Л.В., Опрышко А.А., Самойлова А.Н.

Современная коммуникация: интенциональность, перформативность, медийность..... 438

Бажанов Н.Н.

Современный подход к математическому образованию инженеров (частное мнение)..... 444

Секция I

ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

DOI: 10.18522/syssyn-2024-1

Синергетический синтез адаптивных регуляторов электромеханических систем

Попов Андрей Николаевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
apoprov@sfedu.ru

Аннотация. Доклад посвящен вопросам синергетического синтеза адаптивных регуляторов нелинейных электромеханических систем (ЭМС). Проведена оценка влияния неопределенностей математических моделей ЭМС на свойства замкнутых систем. Рассмотрены общие особенности процедуры синергетического синтеза адаптивных регуляторов, обеспечивающих парирование внешних и параметрических возмущений. Аспекты применения предлагаемого подхода продемонстрированы на примере синтеза адаптивного регулятора для ЭМС с синхронным двигателем, работающим в условиях действия внешнего возмущающего момента и флуктуации активных сопротивлений обмоток.

Abstract. The paper is devoted to the issues of synergistic synthesis of adaptive controllers of nonlinear electromechanical systems (EMS). The influence of uncertainties of mathematical models of EMS on the properties of closed systems is assessed. General features of the procedure of synergistic synthesis of adaptive controllers that provide parrying of external and parametric disturbances are considered. Aspects of application of the proposed approach are demonstrated by the example of synthesis of an adaptive controller for EMS with a synchronous motor operating under conditions of external disturbing torque and fluctuations of active resistances of windings.

Ключевые слова: электромеханические системы, синергетический синтез регулятора, внешние и параметрические возмущения, адаптивное управление.

Keywords: electromechanical systems, synergistic synthesis of the controller, external and parametric disturbances, adaptive control.

I. ВВЕДЕНИЕ

Комплексы машин, механизмов и устройств, функционирующих согласовано и осуществляющих целенаправленное преобразование электрической энергии в

механическое движение, принято выделять в отдельный класс электромеханических систем (ЭМС). Такие системы являются основой большинства промышленных агрегатов, обеспечивают движение транспортных средств на электрической тяге, находят массовое применение в других сферах человеческой деятельности.

Закономерная тенденция к автоматизации основных технологических операций и проектированию «умных» систем привела к развитию ЭМС с автоматическим управлением, в которых функции обеспечения эффективного электромеханического преобразования энергии возложены на автоматические регуляторы.

Ключевой и наиболее важной теоретической задачей, которую приходится решать при проектировании автоматически управляемых ЭМС является задача синтеза регулятора. Она состоит в определении математической структуры автоматических регуляторов (алгоритмов автоматического управления) как совокупности обратных связей, обеспечивающих желаемый режим функционирования ЭМС.

Анализ существующих подходов к проектированию современных управляемых ЭМС позволяют сделать следующие выводы.

1. При синтезе автоматических регуляторов ЭМС в основном используется подход, разработанный почти 70 лет назад (последовательная коррекция и ее вариации) и имеющий строгое математическое обоснование в применении к классу линейных систем с одним каналом управления.

2. Применение методов классической теории автоматического управления для синтеза регуляторов ЭМС приводит к необходимости обоснования и разработки

дополнительных методик, позволяющих экстраполировать линейные подходы для управления нелинейными системами. Результатом такой экстраполяции является усложнение методики настройки контуров управления с типовыми регуляторами, введением в структуру системы дополнительных блоков, компенсирующих взаимовлияние каналов управления и естественные обратные связи по ЭДС вращения двигателя.

3. Методики расчета контуров регулирования в особенности для ЭМС переменного тока содержат дополнительные ограничения и допущения, которые ставят под сомнение математическую строгость и обоснованность такого подхода.

4. Отсутствие аналитических методик расчета приводит к широкому использованию поисковых численных процедур настройки контуров регулирования, применению методов искусственного интеллекта и других информационных технологий.

Применение принципов и методов синергетической теории управления для решения задачи синтеза регуляторов ЭМС позволяет получать алгоритмы векторного управления ЭМС, лишенные указанных недостатков. Использование в процедурах синтеза наиболее адекватных нелинейных математических моделей ЭМС, учет взаимовлияния каналов управления и опора на физические свойства управляемых процессов дают возможность существенно повысить эффективность электромеханического преобразования энергии, обеспечить устойчивость замкнутой системы в широком диапазоне скорости и механической нагрузки и расширить спектр решаемых задач генерации требуемого механического движения [1–8].

Разработанные прикладные методы синергетического синтеза регуляторов используют математические модели ЭМС в виде систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Эти модели включают в себя следующие основные составляющие:

- переменные состояния (электрические, магнитные и механические величины);
- управляющие воздействия (напряжения на обмотках двигателей или их проекции на оси координатной системы);
- параметры (параметры электромагнитных цепей и механических передач);
- момент сопротивления нагрузки, характеризующий действие на систему внешних сил со стороны обслуживаемого технологического процесса.

При этом, как правило, считается, что все переменные измеряются с помощью соответствующих технических средств, параметры известны и неизменны, а момент сопротивления нагрузки является однозначной и известной функцией угловой скорости исполнительного органа ЭМС.

Отмеченные особенности математических моделей ЭМС нашли широкое применение в практике проектирования ЭМС с автоматическим управлением. Подавляющее большинство автоматических регуляторов ЭМС рассчитывается на основе перечисленных допущений.

С другой стороны такое представление реальных процессов в ЭМС является несколько идеализированным. Момент сопротивления нагрузки может изменяться не так, как это определено заданной функцией $M_c(\omega)$, тем самым подчеркивая неполную определенность внешнего воздействия на систему. Параметры математических моделей могут быть оценены априори неправильно, либо могут изменяться в ходе эксплуатации под действием внешних факторов, например, температуры. Не всегда есть возможность измерить некоторые переменные состояния.

Таким образом, в математических моделях ЭМС могут появляться неопределенности различного происхождения, что может стать причиной не только снижения точности регулирования, но и источником возникновения нежелательных режимов работы системы в целом.

В настоящем докладе будут рассмотрены вопросы синтеза аддитивных регуляторов ЭМС, обеспечивающих парирование действующих на систему внешних и параметрических возмущений.

II. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА УПРАВЛЯЕМЫХ ЭМС

В ходе компьютерного моделирования проведена оценка влияния основных факторов неопределенности математических моделей ЭМС на свойства замкнутых систем с регуляторами, синтезированными с помощью регулярной процедуры метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). При этом были приняты следующие предположения.

Момент сопротивления нагрузки в моделях ЭМС описывается функцией вида:

$$M_d = M_c(\omega) + M_d(t),$$

где $M_c(\omega)$ – известная функция угловой скорости; $M_d(t)$ – возмущающий момент, обусловленный непрогнозируемыми воздействиями со стороны технологического процесса и неточностью расчета функции $M_c(\omega)$.

В математических моделях ЭМС всегда присутствуют параметры, характеризующие свойства токопроводящих и магнитопроводящих элементов конструкции электрического двигателя (ЭД). Общепринято описывать указанные свойства параметрами соответствующих электрических цепей, образованных обмотками статора и ротора. К таким параметрам относятся: активные сопротивления обмоток, индуктивности обмоток и их взаимная индуктивность.

В дальнейшем будем считать, что предварительная идентификация параметров электромагнитных цепей двигателя проведена с достаточной точностью, но в процессе эксплуатации ряд этих параметров может изменяться.

Параметрами, которые в наибольшей степени могут отклоняться от своих начальных значений, являются активные сопротивления обмоток ротора и статора. Это обусловлено зависимостью сопротивления проводников от температуры.

Проведенный анализ влияния на свойства управляемых ЭМС внешних и параметрических возмущений, позволил сделать следующие выводы.

1. Синтезированные методом АКАР регуляторы обеспечивают сохранение устойчивости замкнутых систем в условиях действия внешних возмущений и неконтролируемой вариации параметров. Таким образом, внешние и параметрические возмущения не приводят к возникновению критических режимов поведения системы с разработанными регуляторами.

2. Игнорирование действия внешнего возмущающего момента и неконтролируемое изменение активного сопротивления обмоток приводит к появлению статической ошибки по угловой скорости, а, следовательно, может существенно сказываться на точности регулирования и приводить к невыполнению ЭМС своей технологической задачи.

3. Задача синергетического синтеза энергосберегающих регуляторов ЭМС решается путем поддержания энергетических инвариантов, соответствующих математическим условиям минимизации потерь энергии при изменении технологического режима работы [8–11]. В выражения для энергетических инвариантов всегда входят момент сопротивления нагрузки и активные сопротивления обмоток двигателя. В этой связи, игнорирование неконтролируемого изменения этих величин будет приводить к снижению эффективности энергосберегающих регуляторов.

Отмеченные недостатки обуславливают необходимость разработки прикладных методов синтеза адаптивных регуляторов ЭМС, способных не только компенсировать статическую ошибку по скорости, но и производить текущую оценку значений активных сопротивлений обмоток двигателя и возмущающего внешнего момента на его валу.

III. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АДАПТИВНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ЭМС

В первую очередь сформулируем в общем виде задачу синергетического синтеза адаптивных регуляторов ЭМС. Требуется найти вектор управления как функцию переменных состояния ЭМС, обеспечивающий стабилизацию угловой скорости и текущую оценку актуальных значений сопротивлений обмоток двигателя и внешнего возмущающего момента.

Теоретической основой предлагаемого подхода является метод синергетического синтеза адаптивных регуляторов с асимптотическими наблюдателями, предложенный в работах [12, 13]. Имеет смысл кратко изложить его основные положения и отметить особенности ее применения в рамках поставленной задачи синтеза адаптивных регуляторов нелинейных ЭМС.

В процедуре синтеза используется математическая модель расширенной системы следующего вида:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{G}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}; \\ \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}.\end{aligned}\quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор наблюдаемых переменных размерности n ; \mathbf{z} – вектор ненаблюдаемых переменных размерности k (в качестве ненаблюдаемых переменных могут выступать не измеряемые физические переменные, параметры,

задающие и возмущающие воздействия); \mathbf{u} – вектор управляющих воздействий размерности m ; $\mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ и $\mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ – непрерывные нелинейные вектор-функции $\dim \mathbf{g}_0 = (n \times 1)$ и $\dim \mathbf{h}_0 = (k \times 1)$, $\mathbf{G}_1(\mathbf{x})$ – функциональная матрица размерности $n \times k$, $\mathbf{H}_1(\mathbf{x})$ – функциональная матрица размерности $k \times k$.

Дифференциальные уравнения в (1), определяющие динамику ненаблюдаемых переменных \mathbf{z} , формируются либо на основании исходной математической модели (случай не измеряемых переменных состояния), либо исходя из априорной информации о предполагаемом изменении во времени возмущающих воздействий и параметров. В нашем случае ненаблюдаемыми переменными являются возмущающий момент и активные сопротивления обмоток. В дальнейшем предполагается, что изменение этих величин описывается кусочно-постоянной функцией времени. Тогда дифференциальные уравнения относительно ненаблюдаемых переменных запишутся как $\dot{z}_i = 0, i = 1, \dots, k$.

Процедура синтеза состоит из трех основных этапов:

1. Синтез регулятора. Для расширенной системы (1) применяется стандартная процедура метода АКАР в предположении, что все переменные расширенной системы наблюдаемы. Результатом этого этапа является закон управления $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$.

2. Синтез асимптотического наблюдателя. Задача синтеза заключается в построении асимптотической оценки $\hat{\mathbf{z}}$ вектора \mathbf{z} по наблюдаемым значениям вектора \mathbf{x} и синтезированному на первом этапе вектору управления \mathbf{u} .

3. Замена ненаблюдаемых переменных в законе управления их асимптотическими оценками $\mathbf{u} : \hat{\mathbf{z}} \rightarrow \mathbf{z}$.

Синтез регулятора методом АКАР проводится регулярным способом, каких-либо особенностей не имеет. Третий этап представляет собой тривиальную замену переменных. Поэтому ключевым этапом всей процедуры является этап синтеза наблюдателя. Задача синтеза наблюдателя состоит в определении математической зависимости между значениями оценок ненаблюдаемых переменных и значениями наблюдаемых переменных.

Для модели (1) уравнения наблюдателя и вектора оценок имеют вид [12, 13]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{y}} &= \mathbf{L}(\mathbf{x})\mathbf{y} - \mathbf{L}(\mathbf{x}) \int_0^x \Gamma(\mathbf{x}) d\mathbf{x} - \mathbf{h}_0(\mathbf{x}) + \Gamma(\mathbf{x})\mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \\ \dot{\hat{\mathbf{z}}} &= \int_0^x \Gamma(\mathbf{x}) d\mathbf{x} - \mathbf{y}.\end{aligned}\quad (2)$$

В (2) вектор \mathbf{y} – вектор переменных наблюдателя, матрица $\mathbf{L}(\mathbf{x})$, которую условно можно назвать матрицей устойчивости, задается исходя из условий асимптотического схождения ненаблюдаемых переменных и их оценок, а матрица $\Gamma(\mathbf{x})$ находится из матрично-векторного уравнения

$$\mathbf{H}_1(\mathbf{x}) - \mathbf{L}(\mathbf{x}) = \Gamma(\mathbf{x})\mathbf{G}_1(\mathbf{x}). \quad (3)$$

Процедура синтеза достаточно формализована и фактически сводится к правильному формированию матрицы $\mathbf{L}(\mathbf{x})$ и нахождению матрицы $\Gamma(\mathbf{x})$ и ее интеграла по вектору наблюдаемых переменных.

Если параметры и возмущения входят в математическую модель объекта аддитивно, то матрица $\mathbf{L}(\mathbf{x})$ может быть задана как числовая гурвицева матрица \mathbf{L} . Следует отметить, что в нашем случае оцениваемые параметры (сопротивления обмоток) входят в математическую модель мультипликативно, и задание матрицы \mathbf{L} как числовой приведет появлению в матрице $\Gamma(\mathbf{x})$ особенностей. Чтобы этого избежать необходимо формировать матрицу $\mathbf{L}(\mathbf{x})$ как функциональную матрицу. При этом критерии устойчивости линейных систем останутся применимы, если использовать в матрице $\mathbf{L}(\mathbf{x})$ положительно определенные функции переменных состояния.

Продемонстрируем аспекты применения описанного подхода на конкретном примере.

IV. СИНЭРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ЭМС С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Рассматривается ЭМС с явнополюсным синхронным двигателем основного исполнения (СД). Динамику такой ЭМС будет описывать математическая модель, записанная в системе координат (d, q) , вращающейся синхронно с ротором:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \left(\frac{3p}{2} (L_{12d} i_2 i_{1q} + (L_{1d} - L_{1q}) i_{1d} i_{1q}) - M_c \right) \frac{1}{J}; \\ \frac{di_2}{dt} &= \left(-L_{1q} L_{12d} i_{1q} p\omega - r_2 L_{1d} i_2 + r_1 L_{12d} i_{1d} + L_{1d} u_2 - L_{12d} u_{1d} \right) \frac{1}{L}; \\ \frac{di_{1d}}{dt} &= \left(L_{1q} L_2 i_{1q} p\omega - r_1 L_2 i_{1d} + r_2 L_{12d} i_2 + L_2 u_{1d} - L_{12d} u_2 \right) \frac{1}{L}; \\ \frac{di_{1q}}{dt} &= \left(-L_{1d} i_{1d} p\omega - L_{12d} i_2 p\omega - r_1 i_{1q} + u_{1q} \right) \frac{1}{L_{1q}}, \end{aligned}$$

где ω – угловая скорость вращения ротора; i_{1d}, i_{1q} – проекции тока статора на оси координатной системы; u_{1d}, u_{1q} – проекции напряжения статора на оси координатной системы; i_2 – ток в обмотке ротора; u_2 – напряжение на обмотке ротора; p – число пар полюсов; r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток; L_{1d} и L_{1q} – индуктивности обмотки статора по осям d и q ; L_{12d} – взаимная индуктивность обмоток; L_2 – индуктивность обмотки ротора; J – момент инерции ротора; M_c – момент сопротивления нагрузки, создаваемый приводимым механизмом; $L = L_{1d} L_2 - L_{12d}^2$.

Предполагается, что активные сопротивления обмоток статора и ротора могут изменяться, а к валу двигателя приложен возмущающий момент. В этом случае получаем следующую модель расширенной системы:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_1 x_2 x_4 + a_2 x_3 x_4 - a_3 M_c(x_1) - a_3 z_1; \\ \dot{x}_2 &= -a_4 x_1 x_4 - a_5 z_3 x_2 + a_6 z_2 x_3 + a_5 u_3 - a_6 u_1; \\ \dot{x}_3 &= a_7 x_1 x_4 - a_8 z_2 x_3 + a_6 z_3 x_2 + a_8 u_1 - a_6 u_3; \\ \dot{x}_4 &= -a_9 x_1 x_3 - a_{10} x_1 x_2 - a_{11} z_2 x_4 + a_{11} u_2 \\ \dot{z}_1 &= 0; \\ \dot{z}_2 &= 0; \\ \dot{z}_3 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{x} = [\omega \ i_2 \ i_{1d} \ i_{1q}]^T$ – вектор наблюдаемых переменных; $\mathbf{z} = [M_c \ r_1 \ r_2]^T$ – вектор ненаблюдаемых переменных; $\mathbf{u} = [u_{1d} \ u_{1q} \ u_2]^T$ – вектор управляющих воздействий. Параметры модели (4) связаны с параметрами СД следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{3pL_{12d}}{2J}, \quad a_2 = \frac{3p(L_{1d} - L_{1q})}{2J}, \quad a_3 = \frac{1}{J}, \quad a_4 = \frac{pL_{1q}L_{12d}}{L}, \\ a_5 &= \frac{L_{1d}}{L}, \quad a_6 = \frac{L_{12d}}{L}, \quad a_7 = \frac{pL_{1q}L_2}{L}, \quad a_8 = \frac{L_2}{L}, \quad a_9 = \frac{pL_{1d}}{L_{1q}}, \\ a_{10} &= \frac{pL_{12d}}{L_{1q}}, \quad a_{11} = \frac{1}{L_{1q}}. \end{aligned}$$

Синтез регулятора

Поставим задачу синергетического синтеза регулятора для системы (4), который будет обеспечивать выполнение следующих инвариантов:

- $x_1 = \omega^*$ – стабилизация угловой скорости СД;
- $x_2 = i_2^*$ – стабилизация тока в обмотке ротора;
- $x_3 = 0$ – обнуление продольной составляющей тока в обмотке статора.

Исходя из заданных инвариантов и структуры модели (4) на первом этапе процедуры синтеза целесообразно ввести следующую параллельную совокупность инвариантных многообразий:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_4 - \varphi_1 = 0, \\ \psi_2 &= x_2 - i_2^* = 0, \\ \psi_3 &= x_3 = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Очевидно, что инвариантные многообразия $\psi_2 = 0$ и $\psi_3 = 0$ совпадают со вторым и третьим инвариантами, а на пересечении многообразий получаем декомпозированную систему:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_1 i_2^* \varphi_1 - a_3 M_c(x_1) - a_3 z_1; \\ \dot{z}_1 &= 0; \\ \dot{z}_2 &= 0; \\ \dot{z}_3 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

На втором этапе процедуры вводится инвариантное многообразие, совпадающее с первым инвариантом системы:

$$\psi_4 = x_1 - \omega^* = 0.$$

Решение основного функционального уравнения $T_4\dot{\psi}_4 + \psi_4 = 0$ в силу (6) дает «внутреннее» управление

$$\varphi_1 = \frac{1}{a_1 i_2^*} \left(a_3 M_c(x_1) + a_3 z_1 - \frac{1}{T_4} (x_1 - \omega^*) \right).$$

Искомый закон векторного управления ищется как решение системы основных функциональных уравнений метода АКАР $T_i \dot{\psi}_i + \psi_i = 0, i = 1, \dots, 3$ в силу модели (4) и имеет следующий вид:

$$u_1 = \frac{1}{a_8} \begin{pmatrix} -a_7 x_1 x_4 + a_8 z_2 x_3 - a_6 z_3 x_2 + \\ + \frac{a_6}{a_5 a_8 - a_6^2} \begin{pmatrix} a_6 \left(a_8 z_2 x_3 - a_7 x_1 x_4 - a_6 z_3 x_2 - \frac{x_3}{T_3} a_4 x_1 x_4 + \right) \\ + a_5 a_8 z_3 x_2 - a_6 a_8 z_2 x_3 - \frac{a_8 (x_2 - i_2^*)}{T_2} \end{pmatrix} \\ - \frac{x_3}{T_3} \end{pmatrix},$$

$$u_2 = \frac{1}{a_{11}} \begin{pmatrix} \frac{1}{a_1 i_2^*} \left(a_3 \frac{\partial M_c(x_1)}{\partial x_1} - \frac{1}{T_4} \right) + a_9 x_1 x_3 + a_{10} x_1 x_2 + a_{11} z_2 x_4 - \\ - \frac{1}{T_1} \left(x_4 - \frac{1}{a_1 i_2^*} \left(a_3 M_c(x_1) + a_3 z_1 - \frac{1}{T_4} (x_1 - \omega^*) \right) \right) \end{pmatrix},$$

$$u_3 = \frac{1}{a_5 a_8 - a_6^2} \begin{pmatrix} a_6 \left(a_8 z_2 x_3 - a_7 x_1 x_4 - a_6 z_3 x_2 - \frac{x_3}{T_3} a_4 x_1 x_4 + \right) + \\ + a_5 a_8 z_3 x_2 - a_6 a_8 z_2 x_3 - \frac{a_8 (x_2 - i_2^*)}{T_2} \end{pmatrix}.$$

Синтез наблюдателя

На основе модели синтеза (4) формируются необходимые для синтеза наблюдателя матрицы и вектора:

$$\mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} a_1 x_2 x_4 + a_2 x_3 x_4 - a_3 M_c(x_1) \\ -a_4 x_1 x_4 + a_5 u_3 - a_6 u_1 \\ a_7 x_1 x_4 + a_8 u_1 - a_6 u_3 \\ -a_9 x_1 x_3 - a_{10} x_1 x_2 + a_{11} u_2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G}_1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -a_3 & 0 & 0 \\ 0 & a_6 x_3 & -a_5 x_2 \\ 0 & -a_8 x_3 & a_6 x_2 \\ 0 & -a_{11} x_4 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H}_1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Сформируем матрицу устойчивости как диагональную матрицу следующего вида:

$$\mathbf{L}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 x_4^2 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 x_2^2 \end{bmatrix},$$

Тогда из матричного уравнения (3) можно получить матрицу

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{a_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{l_2 x_4}{a_{11}} \\ 0 & \frac{a_8 l_3 x_2}{a_5 a_8 - a_6^2} & \frac{a_6 l_3 x_2}{a_5 a_8 - a_6^2} & 0 \end{bmatrix}.$$

Интегрирование этой матрицы по вектору \mathbf{x} дает следующий результат:

$$\int_0^{\mathbf{x}} \mathbf{G}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \frac{l_1 x_1}{a_3} \\ \frac{l_2 x_4^2}{2 a_{11}} \\ \frac{1}{2} \frac{a_8 l_3 x_2^2}{a_5 a_8 - a_6^2} + \frac{a_6 l_3 x_2 x_3}{a_5 a_8 - a_6^2} \end{bmatrix}.$$

Теперь на основании полученных матриц и векторов и выражений (2) можно записать уравнения наблюдателя и оценок ненаблюдаемых переменных:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= l_1 y_1 - \frac{l_1^2 x_1}{a_3} + \frac{l_1}{a_3} (a_1 x_2 x_4 + a_2 x_3 x_4 - a_3 M_c(x_1)); \\ \dot{y}_2 &= l_2 x_4^2 y_2 - \frac{l_2^2 x_4^4}{2 a_{11}} + \frac{l_2 x_4}{a_{11}} (-a_9 x_1 x_3 - a_{10} x_1 x_2 + a_{11} u_2); \\ \dot{y}_3 &= l_3 x_2^2 y_3 - l_3^2 x_2^2 \left(\frac{1}{2} \frac{a_8 x_2^2}{a_5 a_8 - a_6^2} + \frac{a_6 x_2 x_3}{a_5 a_8 - a_6^2} \right) + \\ &+ \frac{l_3 x_2}{a_5 a_8 - a_6^2} \left(a_8 (-a_4 x_1 x_4 + a_5 u_3 - a_6 u_1) + \right. \\ &\left. + a_6 (a_7 x_1 x_4 - a_6 u_3 + a_8 u_1) \right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{z}_1 &= \frac{l_1 x_1}{a_3} - y_1; \\ \hat{z}_2 &= \frac{l_2 x_4^2}{2 a_{11}} - y_2; \\ \hat{z}_3 &= \frac{1}{2} \frac{a_8 l_3 x_2^2}{a_5 a_8 - a_6^2} + \frac{a_6 l_3 x_2 x_3}{a_5 a_8 - a_6^2} - y_3. \end{aligned}$$

На рис. 1–7 представлены результаты компьютерного моделирования замкнутой системы с синтезированным адаптивным регулятором. Имитировался разгон двигателя в номинальную скорость с дальнейшей вариацией возмущающего момента и активных сопротивлений обмоток. При моделировании использовались параметры СД типа СТД-1250.

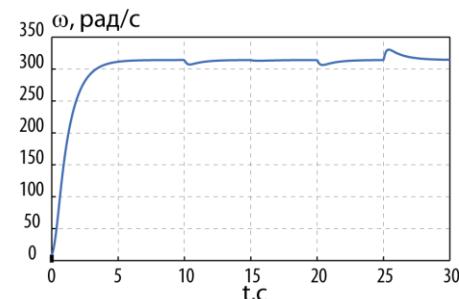


Рис. 1. Угловая скорость двигателя

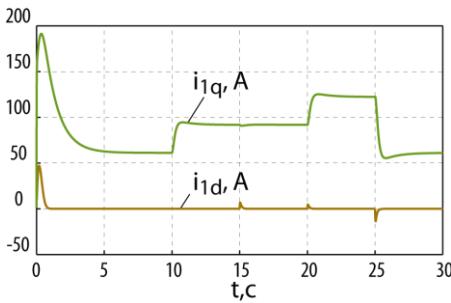


Рис. 2. Проекции тока статора

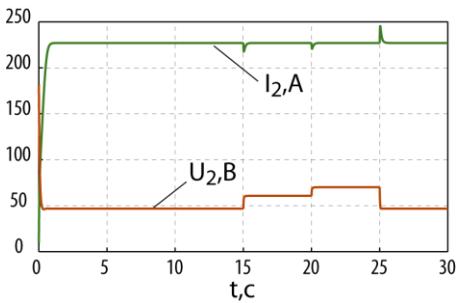


Рис. 3. Ток и напряжение ротора

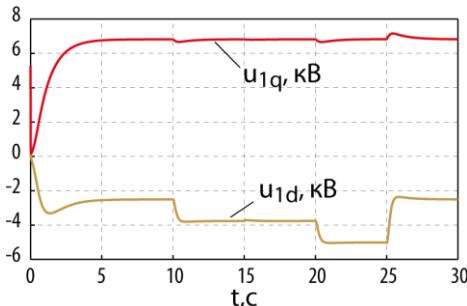


Рис. 4. Проекции напряжения статора

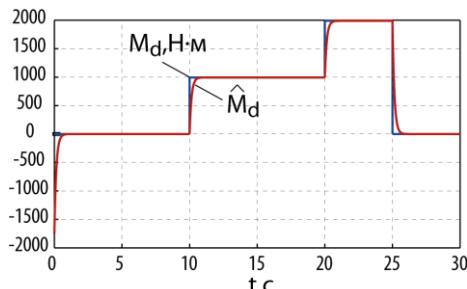


Рис. 5. Возмущающий момент и его оценка

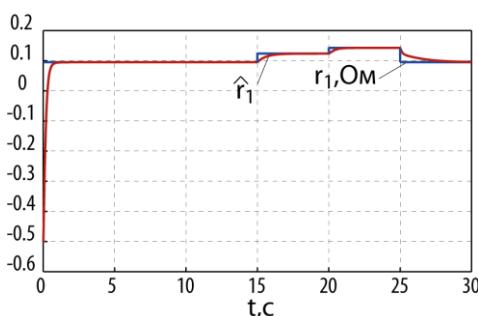


Рис. 6. Сопротивление обмотки статора и его оценка

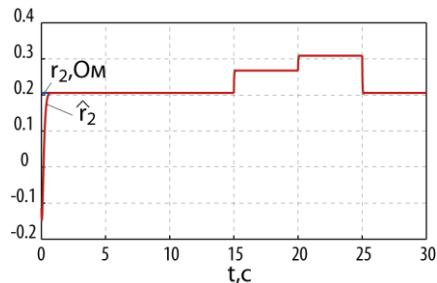


Рис. 7. Сопротивление обмотки ротора и его оценка

Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что синтезированный регулятор работает корректно: цели управления выполняются, действие возмущающего момента и флюктуация активных сопротивлений обмоток парируются.

Использованный набор инвариантов, однако, не обеспечивает оптимизацию энергетических показателей ЭМС при изменении технологического режима. На рис. 8 представлен полученный в ходе моделирования график изменения КПД двигателя при изменении суммарного момента нагрузки. После разгона СД с $M_{\Sigma} = 0,5M_{\text{ном}}$, момент нагрузки менялся согласно последовательности: $M_{\text{ном}}, 0,75M_{\text{ном}}, 0,25M_{\text{ном}}, 0,15M_{\text{ном}}$. Хотя это не сказалось на выполнении основной технологической задачи стабилизации угловой скорости, КПД двигателя существенно изменялся. При малом моменте нагрузки его падение достигало 10% относительно номинального режима.

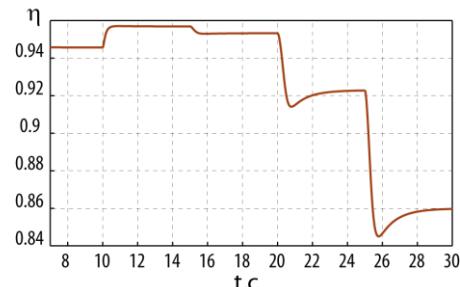


Рис. 8. Изменение КПД двигателя при вариации возмущающего момента

Адаптивный энергосберегающий регулятор ЭМС с СД может быть получен при использовании подхода, изложенного в работах [8–11].

Оптимальное с точки зрения минимума потерь энергии значение тока ротора определяется энергетическим инвариантом

$$i_{2\text{опт}} = M_c^{0.5} \left(\frac{k_7}{k_8 + k_9 \omega^\beta} \right)^{0.25}, \quad (7)$$

где $k_7 = \frac{2r_1}{3p^2 L_{12d}^2}$, $k_8 = r_2$, $k_9 = \frac{\Delta P_{\text{ст.ном}}}{p^\beta 314^\beta i_{2\text{ном}}^2}$, $\Delta P_{\text{ст.ном}}$ –

потери в стали в номинальном режиме, $i_{2\text{ном}}$ – номинальный ток в обмотке ротора, $\beta \approx 1,2$ – коэффициент, зависящий от марки стали.

С точки зрения процедуры синергетического синтеза практически ничего не меняется. Единственное отличие заключается в задании инвариантного многообразия

$\psi_2 = 0$. Чтобы обеспечить выполнение энергетического инварианта (7) и учесть возможные внешние и параметрические возмущения, это многообразие нужно задавать в следующем виде:

$$\psi_2 = x_2 - \left| M_c(\omega^*) + z_1 \right|^{0.5} \left| \frac{k_{16}z_2}{z_3 + k_9\omega^{*\beta}} \right|^{0.25} = 0,$$

где $k_{16} = \frac{2}{3p^2 L_{12d}^2}$.

На рис. 9–14 приведены результаты моделирования замкнутой системы с адаптивным энергосберегающим регулятором. Имитировался разгон двигателя в номинальную скорость при отсутствии возмущающего момента и номинальных значениях сопротивления обмоток. Затем оценивалась реакция системы на действие возмущающего момента и флюктуацию сопротивлений обмоток (увеличение до 50% от номинала). Этот регулятор производит изменение значения тока в обмотке ротора при изменении режима работы ЭМС, тем самым обеспечивая его оптимизацию в смысле минимизации потерь энергии в СД.

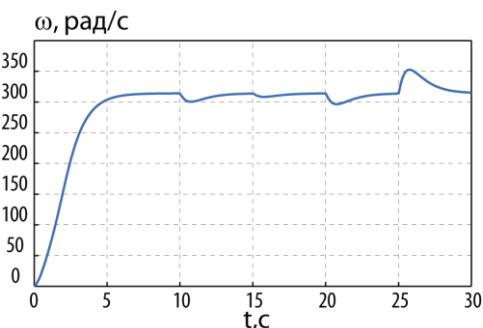


Рис. 9. Угловая скорость двигателя

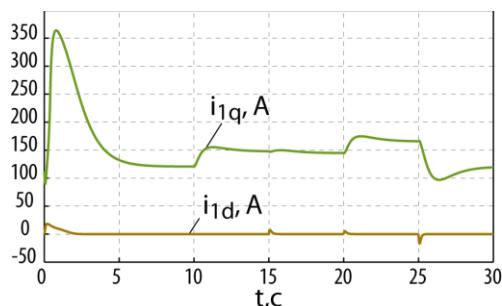


Рис. 10. Проекции тока статора

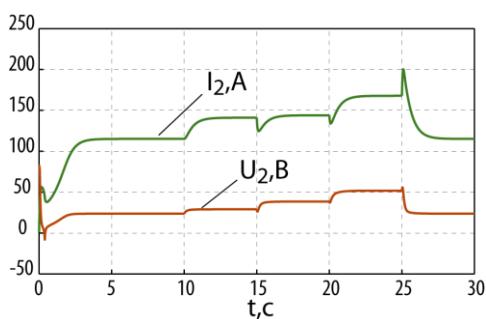


Рис. 11. Ток и напряжение ротора

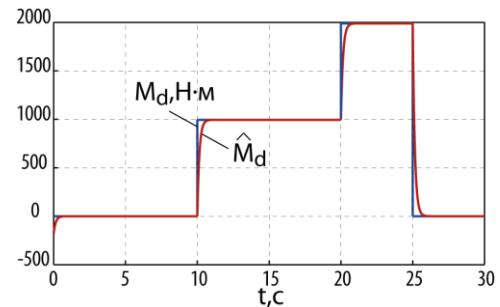


Рис. 12. Возмущающий момент и его оценка

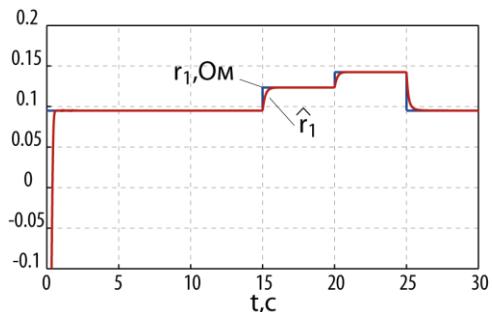


Рис. 13. Сопротивление обмотки статора и его оценка

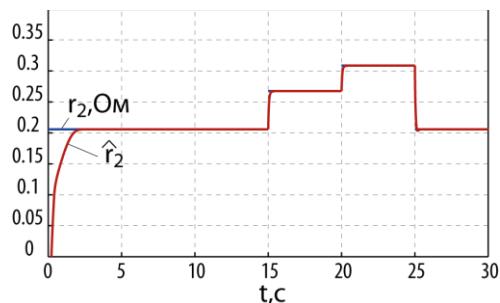


Рис. 14. Сопротивление обмотки ротора и его оценка

Полученные результаты моделирования подтверждают все теоретические положения, демонстрируя устойчивость системы относительно заданного состояния, асимптотическое сходжение оценок к значениям ненаблюдаемых переменных и минимизацию потерь энергии.

Последнее подтверждает рис. 15, на котором представлен график переходного процесса КПД двигателя при вариации суммарного момента нагрузки за счет действия возмущения. После разгона СД с $M_{\Sigma} = 0,5M_{\text{ном}}$, момент нагрузки менялся согласно последовательности: $M_{\text{ном}}, 0,75M_{\text{ном}}, 0,25M_{\text{ном}}, 0,15M_{\text{ном}}$.

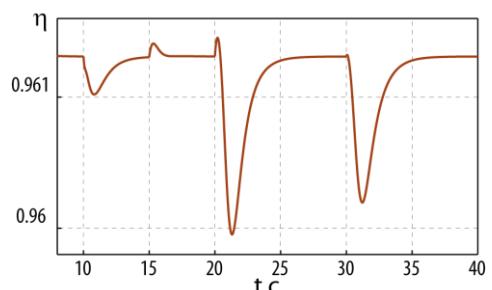


Рис. 15. Изменение КПД СД при вариации возмущающего момента

Очевидно, что синтезированный энергосберегающий регулятор обеспечивает поддержание КПД двигателя в максимальном значении во всем допустимом диапазоне изменения суммарного момента нагрузки.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе был изложен общий подход к решению задач синергетического синтеза адаптивных регуляторов нелинейных ЭМС, обеспечивающих парирование действующих на систему внешних и параметрических возмущений.

Теоретические положения подтверждены результатами компьютерного моделирования замкнутых систем. Это позволяет утверждать, что применение данного подхода позволит проектировать управляемые ЭМС, отвечающие современным требованиям как к точности регулирования, так и к максимальной эффективности процессов электромеханического преобразования энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная прикладная теория управления. Ч. III. Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. - Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2000.
2. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. и др. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – Изд. стереотип. URSS, 2019.
3. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Колесников Ал.А. Синергетическое управление нелинейными электромеханическими системами. – М.: Испо-Сервис, 2000.
4. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. Синергетическое управление нелинейным электроприводом. I. Концептуальные основы синергетического синтеза систем // Известия вузов, Электромеханика. – Новочеркасск: 2005. – № 6. – С. 8-15.
5. Колесников А.А., Попов А.Н. Синергетическое управление нелинейным электроприводом II. Векторное управление электроприводами постоянного тока // Известия вузов, Электромеханика. – Новочеркасск, 2006. – № 1. – С. 6-17.
6. Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетическое управление нелинейным электроприводом III. Векторное управление асинхронными электроприводами // Известия вузов, Электромеханика. – Новочеркасск, 2006. – № 2. – С. 25-36.
7. Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов // Известия РАН. Теория и системы управления. – М., 2014. – № 4. – С. 123-137.
8. Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. – Таганрог: Изд-во ТРГУ. 2003.
9. Попов А.Н. Синергетический подход к синтезу законов энергосберегающего управления техническими системами // Нелинейный мир. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2005. – № 3 – С. 112-123.
10. Попов А.Н. Синергетический синтез систем энергосберегающего управления электромеханическими процессами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 74-83.
11. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. Инварианты электромеханических систем и вибромеханики // Сборник научных трудов «Синергетика и проблемы теории управления» / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Изд-во «Физматлит», 2004. – С. 251-269.
12. Современная прикладная теория управления: Ч. II. Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – Москва; Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2000.
13. Колесников А.А., Балалаев Н.В. Синергетический синтез нелинейных систем с наблюдателями состояния // Новые концепции общей теории управления: сборник научных трудов / под ред. А.А. Красовского. – Москва; Таганрог: ТРГУ, 1995. – С. 101-105.

Исследование управления процессами биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ АгроЛЭТИ»

Андреев Александр Васильевич
Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
a-sanya01@mail.ru

Грудяева Елизавета Сергеевна
Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
1000gek@mail.ru

Душин Сергей Евгеньевич
Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
dushins@yandex.ru

Аннотация. Целью исследования является установление эффективности системы управления биологической очистки сточных вод с использованием компьютерной модели трехзонного реактора с мембранным блоком в условиях действия возмущений для рассматриваемого предприятия. Выяснено, что можно управлять процессом очистки путем ПИ-регулирования, а также в определенных случаях производить адаптацию интегрального параметра за счет применения эталонной модели.

Abstract. The goal of the research is to establish the effectiveness of biological wastewater treatment control system using a computer model of a three-zone reactor with a membrane block under disturbance conditions for the enterprise under consideration. As a result of research it was found that it is possible to control the treatment process with application of PI controller and in certain cases to adapt the integral parameter with the usage of reference model.

Ключевые слова: биологическая очистка, активный ил, модель ASM1, трехзонный биореактор.

Keywords: biological wastewater treatment, activated sludge, ASM1 model, three-zone bioreactor.

I. ВВЕДЕНИЕ

В животноводческом комплексе «ИДАВАНГ АгроЛЭТИ», занимающимся выращиванием свиней, присутствует потребность очистки стоков. Присутствующая на текущий момент система очистки является эффективной (параметры после очистки соответствуют предельно-допустимым концентрациям, или ПДК), однако также система имеет недостаток: после стадии предварительной фильтрации (очистка стоков от механических примесей) в атмосферу здания выделяется аммиак. Данное явление негативно сказывается на самой технике спустя определенный промежуток времени, в следствие чего персоналу приходится периодически заниматься поиском решения проблемы и ее своевременным устранением. В виду остановки процесса на данном этапе процессы могут встать и на стадии предварительной фильтрации. Подробнее система очистки описана в [1].

Потому присутствует потребность рассмотрения биологической очистки стоков как альтернативного решения, не имеющего приведенного недостатка. Следует отметить, что данный метод очистки ранее применялся

на предприятии, но тогда оно имело другого собственника и данные по биоочистке на данный момент являются утерянными. Таким образом с целью устранения присутствующего недостатка возникает задача анализа управляемых процессов биологической очистки с использованием моделирования для того, чтобы определить возможно ли применение данного метода на рассматриваемом предприятии.

II. МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ

В качестве базовой модели биологической очистки принимается модель активного ила 1 (Activated Sludge Model No. 1 или ASM1), которая описана в [2]. Причем ввиду ее сложности были проведены исследования по рассмотрению процессов упрощенных моделей нитрификации и денитрификаций, что отображено в [3], где также было выяснено, что использование просто модели ASM1 является недостаточным для достижения удовлетворительной очистки, поскольку сама модель не учитывает необходимость деления реактора на зоны. Поэтому на базе модели ASM1 были построены модели двухзонного и трехзонного реакторов, а также трехзонного реактора с мембранным блоком. В результате исследований построенных моделей было выяснено, что для рассматриваемого предприятия необходимо применение трехзонного реактора с мембранным блоком, поскольку только данный вид реактора позволяет достичь результатов очистки в пределах ПДК в течение всего процесса очистки после «сухой» загрузки ила в условиях, когда концентрации загрязняющих веществ неизменны.

Вместе с тем, ранее не было произведено исследований с целью установления поведения рассматриваемой системы в условиях, когда входные концентрации загрязнений изменяются, что имеет место быть на практике и потенциально может приводить к изменению концентраций на выходе выше ПДК.

Для исследования модели с предприятия были получены следующие данные (данные по концентрациям веществ в поступающих стоках были получены в результате лабораторного анализа):

$S_{\text{O}_2}^{\text{вх}} = 6 \text{ г/м}^3$ – входная концентрация растворенного кислорода,

$S_{\text{nh}}^{\text{вх}} = 30 \text{ г/м}^3$ – входная концентрация аммонийного азота,

$S_{\text{no}}^{\text{вх}} = 18,6 \text{ г/м}^3$ – входная концентрация нитратного азота,

$S_{\text{ph}}^{\text{вх}} = 6,5 \text{ ЭКВ/м}^3$ – входное значение щёлочности

$S_s^{\text{вх}} = 100 \text{ г/м}^3$ – входное значение растворенного биологически разложимого органического вещества (далее сокращено, как РОВ),

$V = 2700 \text{ м}^3$ – объём реактора.

Информация о ПДК аммонийного и нитратного вида азотов при сбросе сточных вод в водные объекты культурно-бытового водопользования была взята из [4]:

$$S_{\text{nh}}^{\text{ПДК}} = 2 \text{ г/м}^3, S_{\text{no}}^{\text{ПДК}} = 10 \text{ г/м}^3,$$

причем данные о ПДК были скорректированы с целью учета погрешности измерительных приборов:

$$S_{\text{nh}}^{\text{ПДК,кор}} = 1,71 \text{ г/м}^3, S_{\text{no}}^{\text{ПДК,кор}} = 9,7 \text{ г/м}^3.$$

Значения констант насыщения, гидролиза, распада, параметры фракций, коэффициенты прироста, максимальные удельные скорости роста, корректирующие факторы скорости роста веществ и бактерий были заимствованы из [5]. На рис. 1 представлена используемая модель трехзонного реактора, а на рис. 2 модель реактора с мембранным блоком.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ СТОКОВ

Следует отметить, что из полученных с предприятия данных о загрязнениях изменяемыми полагаются только входные концентрации аммонийного и нитратного азотов, РОВ, а также растворенного кислорода. Значение щелочности на входе полагается неизменным поскольку, во-первых, ввиду особенностей модели ASM1, можно оценить только его влияние исключительно на соответствующую концентрацию в реакторе и, во-вторых, с предприятия не удалось получить достоверных данных касаемо допустимых значений щелочности среды, куда происходит сброс стоков (в зависимости от почвы на конкретной местности могут допускаться разные диапазоны значений).

Вместе с тем, ввиду структуры принятого трехзонного реактора с мембранным блоком, которая описана в [3, 5], параметр входной концентрации растворенного кислорода принимается не только изменяемым, но и управляемым, поскольку существует возможность его изменять при подаче кислорода в зону нитрификации. Таким образом, далее будет проводится исследование влияния изменения концентраций аммонийного и нитратного азотов, а также РОВ в исходной воде на выходные концентрации загрязнений путем моделирования при помощи программного средства MATLAB/Simulink.

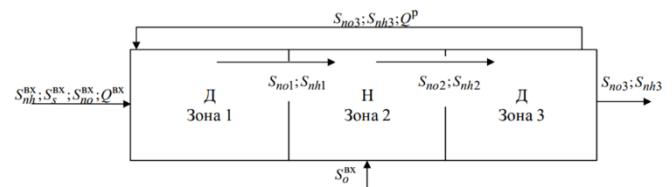


Рис. 1. Схема трехзонного реактора

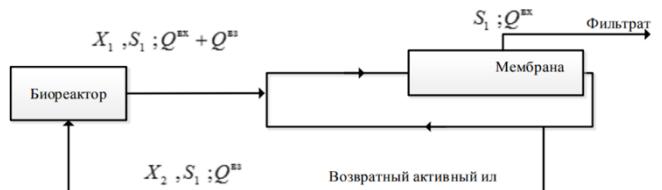


Рис. 2. Схема трехзонного реактора с мембранным блоком

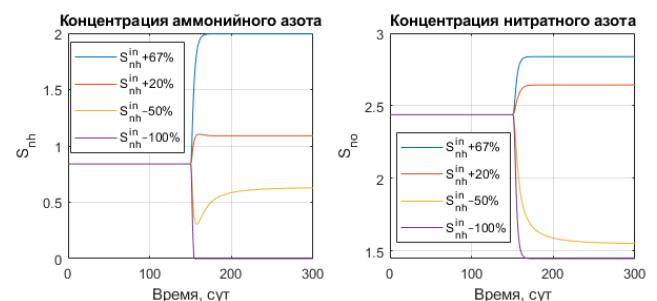


Рис. 3. Процессы на выходе реактора при изменении аммонийного азота на входе

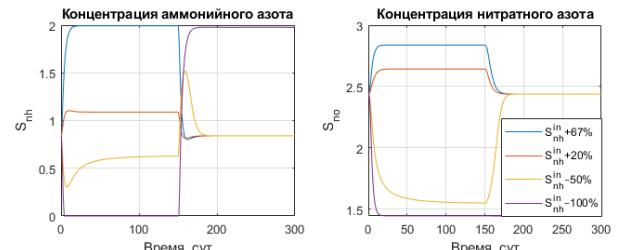


Рис. 4. Процессы на выходе реактора при прекращении действия возмущения по аммонийному азоту на входе

Следует отметить, что данные концентрации могут изменяться как по-одиночке, так и вместе. На текущий момент было принято решение провести исследование отдельных концентраций с целью оценки их влияния на рассматриваемые параметры.

A. Исследование влияния аммонийного азота в стоках

На рис. 3 приведены результаты моделирования системы при изменении аммонийного азота в момент времени $T = 150$ сут на различные величины.

Как можно наблюдать на приведенном рисунке, повышение аммонийного азота с значения $S_{\text{nh}}^{\text{вх}} = 30 \text{ г/м}^3$ на 67% приводит к тому, что аммонийный азот на выходе системы находится на ПДК ($S_{\text{nh}}^{\text{вых}} = 2 \text{ г/м}^3$), причем данное значение также можно считать не только граничным, но и недопустимым, если учитывать корректировку ПДК относительно погрешности измерительных приборов (пока фактическое значение аммония на выходе системы будет на ПДК, датчик уже покажет его превышение). Таким образом, дальнейшее повышение аммонийного азота (выше 67%) также является недопустимым. Пони-

жение же аммонийного азота на входе на 100% (т.е. его отсутствие в стоках на входе реактора, что на практике невозможно) приводит к понижению соответствующей концентрации на выходе до нуля, однако в данном случае возникает вопрос о том, сможет ли система вернуться на прежний режим работы при возвращении входной концентрации аммония до значения $30 \text{ г}/\text{м}^3$. Для решения данного вопроса было проведено повторное моделирование процессов в системе, приведенное на рис. 4, где в момент времени $T = 0$ сут исследуемый параметр изменяется на различные величины, а в момент $T = 150$ сут возвращается на прежнее значение.

На приведенном рисунке можно наблюдать, что после отсутствия аммонийного азота на входе его появление на прежнем значении в $30 \text{ г}/\text{м}^3$ приводит к тому, что выходные концентрации аммонийного и нитратного азотов не возвращаются на прежнее значение (в отличие от иных случаев): аммонийный азот повышается до ПДК, а нитратный азот остается неизменным. Это связано с тем, что за счет отсутствия аммонийного азота на входе произошло отмирание бактерий-нитрификаторов, участвующих в процессе очистки.

Таким образом, при изначальном режиме работы системы при концентрации аммонийного азота $S_{nh}^{bx} = 30 \text{ г}/\text{м}^3$ считается недопустимым его повышение на 67% ($S_{nh}^{bx} = 50,1 \text{ г}/\text{м}^3$), что имеет место на рассматриваемом объекте, а также понижение до нуля (невозможно на практике), поскольку в данных случаях параметр аммонийного азота на выходе переходит на ПДК в момент действия возмущения, или после окончания его действия.

B. Исследование влияния нитратного азота в стоках

На рис. 5 приведены результаты моделирования системы при изменении нитратного азота в момент времени $T = 150$ сут на различные величины.

Как можно наблюдать на приведенном рисунке, повышение нитратного азота с значения $S_{no}^{bx} = 18,6 \text{ г}/\text{м}^3$ на 497% приводит к тому, что нитратный азот на выходе повышается до ПДК ($S_{no}^{bx} = 10 \text{ г}/\text{м}^3$), т.е. при дальнейшем повышении нитратного азота на входе (выше 497%) соответствующая концентрация на выходе будет превышать ПДК, что является недопустимым. Как было описано ранее при исследовании аммонийного азота, ввиду потенциальной погрешности измерительных приборов данное значение также принимается недопустимым. Однако, в отличие от случая изменения аммонийного азота, понижение нитратного азота до нуля (невозможно на практике) не приводит к снижению соответствующей концентрации на выходе до того же значения. Кроме того, после отсутствия нитратного азота на входе, его обратное повышение до концентрации $18,6 \text{ г}/\text{м}^3$ приводит к возвращению аммонийного и нитратного вида азотов на прежние значения, что отображено на рис. 6.

Таким образом, при изначальном режиме работы системы при концентрации нитратного азота $S_{no}^{bx} = 18,6 \text{ г}/\text{м}^3$ считается недопустимым его повышение на 497% ($S_{no}^{bx} = 111,042 \text{ г}/\text{м}^3$), поскольку в данном случае параметр нитратного азота на выходе переходит на ПДК в момент действия возмущения.

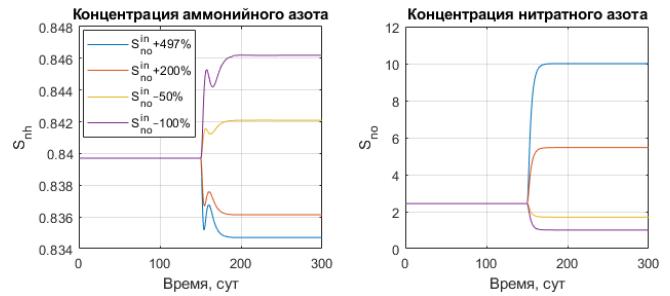


Рис. 5. Процессы на выходе реактора при изменении нитратного азота на входе

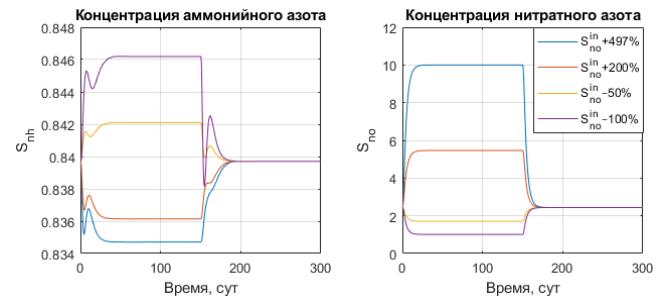


Рис. 6. Процессы на выходе реактора при прекращении действия возмущения по нитратному азоту на входе

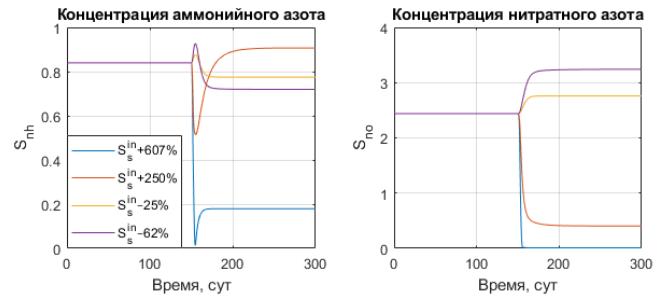


Рис. 7. Процессы на выходе реактора при изменении РОВ на входе

C. Исследование влияния РОВ в стоках

На рис. 7 приведены результаты моделирования системы при изменении РОВ в момент времени $T = 150$ сут на различные величины.

Как можно наблюдать на приведенном рисунке, изменение РОВ с значения $S_s^{bx} = 100 \text{ г}/\text{м}^3$ на +607%, +250%, -25% и -62% не приводит к тому, чтобы аммонийный и/или нитратный азот повышались до ПДК. Однако следует отметить, что, во-первых, на этот раз исследуемая входная концентрация при исследовании не понижалась до нуля ввиду того, что при изменении РОВ ниже -62% система не моделируется, а, во-вторых, при повышении РОВ на 607% нитратный азот понижается до нуля, т.е. возможно при возвращении РОВ на значение концентрации $100 \text{ г}/\text{м}^3$ выходные значения концентраций не вернутся на прежние значения. Причем дальнейшее повышение РОВ на входе (выше 607%) оставляет нитратный азот на выходе нулевым, понижая далее аммонийный, что потенциально может привести к отмиранию бактерий-нитрификаторов, как было выяснено ранее при исследовании аммонийного азота. Поэтому было проведено повторное моделирование процессов в системе, где в момент времени $T = 0$ сут исследуемый

параметр изменяется на различные величины, а в момент $T = 150$ сут возвращается на прежнее значение, результаты приведены на рис. 8.

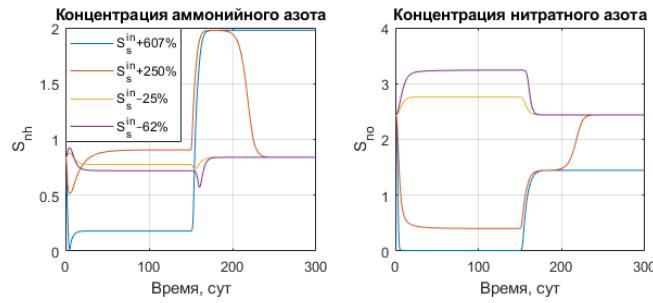


Рис. 8. Процессы на выходе реактора при прекращении действия возмущения по РОВ на входе

На приведенном рисунке можно наблюдать, что возвращение РОВ на прежнее значение концентрации после его повышения на 607% приводит к тому, что аммонийный азот устанавливается на ПДК. Также, после повышения РОВ на 250% при возвращении на прежний режим работы аммонийный азот до 200 суток проходит выше границы скорректированного ПДК. Оба случая являются недопустимыми ввиду ранее описанной потенциальной погрешности измерительных приборов.

Таким образом, при изначальном режиме работы системы при концентрации РОВ $S_s^{bx} = 100 \text{ г/м}^3$ считается недопустимым его повышение на 607% ($S_s^{bx} = 707 \text{ г/м}^3$) и 250% ($S_s^{bx} = 350 \text{ г/м}^3$), а также не рекомендуется понижение на 62% ($S_s^{bx} = 38 \text{ г/м}^3$), поскольку в первых двух случаях параметр аммонийного азота на выходе переходит на ПДК или устанавливаясь на нем, или во время переходного процесса, а в последнем случае невозможно предсказать поведение системы при дальнейшем понижении параметра.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ

В виду того, что часть исследованных ранее отклонений приводит к неудовлетворительному результату очистки (контролируемые параметры на выходе переходят на границу ПДК) имеет смысл рассмотреть применение регулирования в системе для данных случаев.

Как было выяснено ранее в [3, 5], управлять процессами в системе можно путем изменения входной подачи стоков Q^{in} , рециркуляционного потока между зонами реактора Q^r , возвратного потока из мембранны в реактор Q^{ret} и концентрации кислорода на входе зоны нитрификации S_s^{bx} . Также следует отметить, что при рассмотрении процессов в системе необходимо одновременно контролировать не один, а два выходных параметра: аммонийный и нитратных азоты (для определенных объектов также добавляется третий параметр – химическое потребление кислорода или ХПК). Причем при исследованиях, описанных в [5] был сделан выбор в пользу логико-динамического регулирования, позволяющего оказывать одновременное воздействие на перечисленные выше четыре величины и с использованием информации об отклонении трех параметров. Однако разработка подобного метода требует в том числе понимания поведения

тех или иных процессов системы при оказании на них воздействия по определенной величине. С целью получения понимания (и тем самым разработки в дальнейшем более сложного регулятора) было решено сначала применить ПИ-регулирование, причем в конкретный момент времени оказывая воздействие только на одну величину из четырех и используя только один из двух контролируемых параметров. На рис. 9 приведена структурная схема регулирования для случая выбора управляющего воздействия S_o^{bx} и контролируемого параметра $S_{nh}^{вых}$, на рис. 10 – аналогичная схема для случая выбора управляющего воздействия Q^r и контролируемого параметра $S_{nh}^{вых}$.

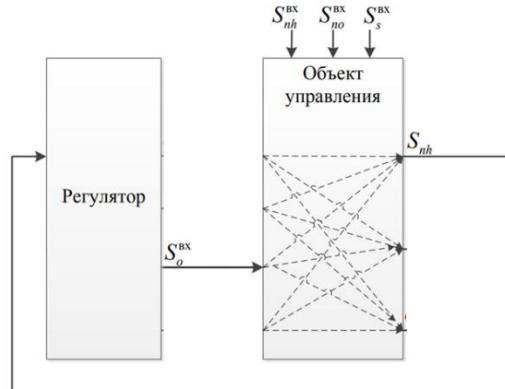


Рис. 9. Структурная схема системы управления для случая выбора управляющего воздействия S_o^{bx} и ошибки e_{nh}

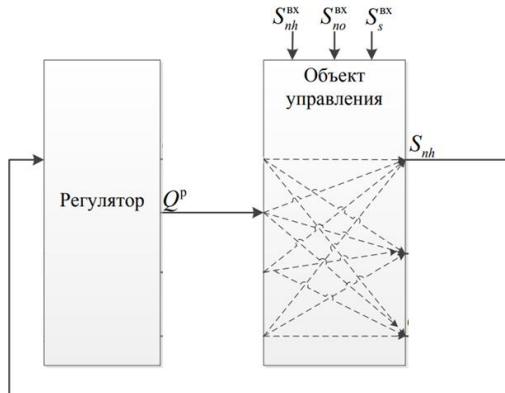


Рис. 10. Структурная схема системы управления для случая выбора управляющего воздействия Q^r и ошибки e_{nh}

Настройка регуляторов будет производится вручную: сначала будет изменяться пропорциональная составляющая, пока контролируемый параметр не достигнет 5-10% отклонения от целевого значения, затем будет изменяться интегральная компонента. Если данный алгоритм не сработает, то выбор будет производится в пользу применения, например, исключительно П- или И-компоненты.

A. Исследование регулирования при возмущении по аммонийному азоту

Как было указано ранее, повышение аммонийного азота на входе до $S_{nh}^{bx} = 50,1 \text{ г/м}^3$ приводит к тому, что аммонийный азот на выходе переходит на ПДК. Таким образом необходимо производить регулирование.

Используя данные об ошибке аммонийного азота (e_{nh}) удалось оказать воздействие только на три исполнительных механизма (при попытке управления через возвратный поток Q^{ret} система не моделируется), результаты моделирования приведены на рис. 11.

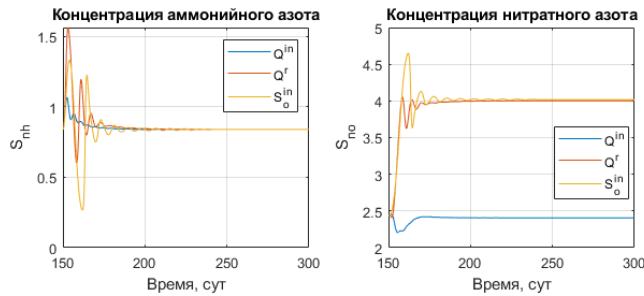


Рис. 11. Регулирование системы при возмущении по аммонийному азоту через различные исполнительные механизмы по e_{nh}

Как можно наблюдать на приведенном рисунке, вне зависимости от выбора исполнительного механизма (величины Q^{in} , Q^r или S_o^{bx}) удается при действии на входе концентрации $S_{nh}^{bx} = 50,1 \text{ г/M}^3$ не допустить переход аммонийного азота на выходе системы на ПДК и в результате переходного процесса вернуть его на прежнее значение. Однако в случае выбора в качестве исполнительного механизма насоса рециркуляционной подачи между зонами (величина Q^r) или компрессора подачи кислорода в зону нитрификации (величина S_o^{bx}) наблюдается повышение нитратного азота, пусть и в допустимых пределах.

Используя данные об ошибке нитратного азота (e_{no}) снова удалось оказать воздействие только на три исполнительных механизма (при попытке управления через возвратный поток Q^{ret} система не моделируется), результаты моделирования приведены на рис. 12.

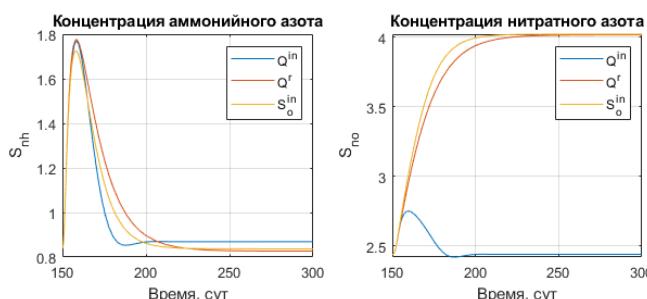


Рис. 12. Регулирование системы при возмущении по аммонийному азоту через различные исполнительные механизмы по e_{no}

На приведенном рисунке можно наблюдать, что результаты в целом аналогичны регулированию по ошибке аммонийного азота e_{nh} : вне зависимости от выбора управляющего воздействия удается обеспечивать допустимую концентрацию аммонийного азота на выходе (но с большей величиной ошибки), причем нитратный азот на выходе системы снова не повышается в установившемся режиме только при выборе в качестве исполнительного механизма насоса входной подачи стоков (величина Q^{in}). Однако следует иметь в виду также ранее описанную потенциальную погрешность измерительных приборов (то есть для модели необходимо иметь в виду не сами границы ПДК, а их ранее скорректированные

значения). Например, вне зависимости от выбора исполнительного механизма датчики могут показать, что концентрация аммонийного азота превышает ПДК (даже если фактически она будет ниже $1,8 \text{ г/M}^3$) во время переходного процесса. То есть результат применения регулирования по ошибке нитратного азота e_{no} принимается неудовлетворительным.

Таким образом, в случае регулирования возмущения по аммонийному азоту не удается рассмотреть регулирование через управляющее воздействие возвратной подачи стоков из мембранны (Q^{ret}), в то время как все остальные воздействия позволяют достичь удовлетворительного результата в установившемся режиме. В то же время, использование ошибки по нитратному азоту e_{no} приводит к неудовлетворительному переходному процессу, поскольку аммонийный азот на выходе проходит вблизи ПДК.

B. Исследование регулирования при возмущении по нитратному азоту

Как было указано ранее, повышение нитратного азота на входе до $S_{no}^{bx} = 111,042 \text{ г/M}^3$ приводит к тому, что нитратный азот на выходе переходит на ПДК. Используя данные об ошибке аммонийного азота (e_{nh}) удалось оказать воздействие на все исполнительные механизмы, результаты моделирования приведены на рис. 13.

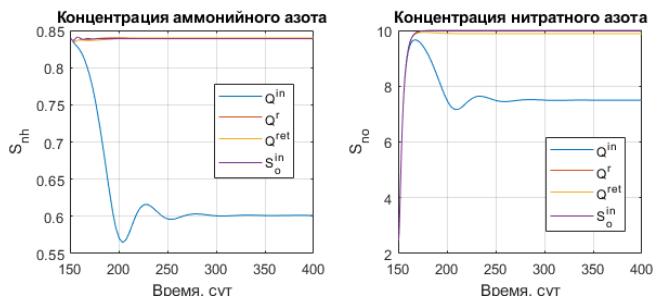


Рис. 13. Регулирование системы при возмущении по нитратному азоту через различные исполнительные механизмы по e_{nh}

Как можно наблюдать на приведенном рисунке, только при оказании воздействия на входную подачу стоков удается при действии на входе концентрации $S_{no}^{bx} = 111,042 \text{ г/M}^3$ уменьшить нитратный азот на выходе системы, во всех остальных случаях не удается оказать достаточного воздействия и нитратный азот всегда близок к ПДК.

Используя данные об ошибке нитратного азота (e_{no}) снова удалось использовать все управляющие величины, результаты моделирования приведены на рис. 14.

На приведенном рисунке можно наблюдать, что результаты аналогичны регулированию по ошибке аммонийного азота e_{nh} : только изменение входной подачи стоков (Q^{in}) позволяет оказать такое воздействие, чтобы оба параметра остались в пределах ПДК, аналогичный результат можно достичь и путем оказания воздействия на возвратный поток из мембранны (величина Q^{ret}), однако в данном случае в системе наблюдается отмирание организмов ила, что также отображено на рисунке. В случае остальных двух управляющих воздействий наблюдается не только отмирание организмов, но и переход аммонийного и нитратного вида азотов к границе ПДК.

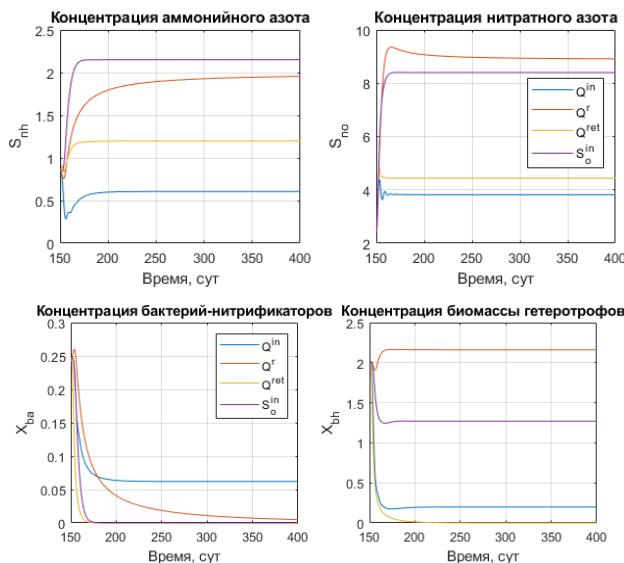


Рис. 14. Регулирование системы при возмущении по нитратному азоту через различные исполнительные механизмы по e_{no}

Таким образом, в случае регулирования возмущения по нитратному азоту удается рассмотреть все управляющие величины, причем вне зависимости от выбора ошибки для формирования воздействия удовлетворительный результат можно обеспечить только оказанием воздействия на входную подачу стоков (величина Q^{in}), в то время как все остальные управляющие величины или допускают прохождение одного или двух контролируемых параметров выше скорректированных значений ПДК, или отмирание биоорганизмов ила в реакторе, что приводит к невозможности дальнейшего проведения очистки без остановки процесса для загрузки новых организмов.

C. Исследование регулирования при возмущении по РОВ

Как было указано ранее, повышение РОВ на входе до $S_{no}^{bx} = 707,15 \text{ г/м}^3$ приводит к тому, что аммонийный азот на выходе переходит на ПДК. Таким образом необходимо производить регулирование.

Используя данные об ошибке аммонийного азота (e_{nh}) удалось использовать все управляющие величины, результаты моделирования приведены на рис. 15.

Как можно наблюдать на приведенном рисунке, при действии на входе концентрации $S_s^{bx} = 707,15 \text{ г/м}^3$ вне зависимости от выбора исполнительного механизма аммонийный азот понижается до нуля, а бактерии-нитрифициаторы отмирают. Таким образом далее отсутствует возможность производить очистку без дополнительной загрузки биоорганизмов. Причем следует отметить, что само повышение РОВ на входе действительно компенсируется, поскольку на рисунке видно, что в случае всех исполнительных механизмов, кроме возвратного потока из мембранны (Q^{ret}) РОВ на выходе системы устанавливается на том же значении, что и до изменения концентрации на входе.

Используя данные об ошибке нитратного азота (e_{no}) снова удалось оказать воздействие на все исполнительные механизмы, результаты моделирования приведены на рис. 16.

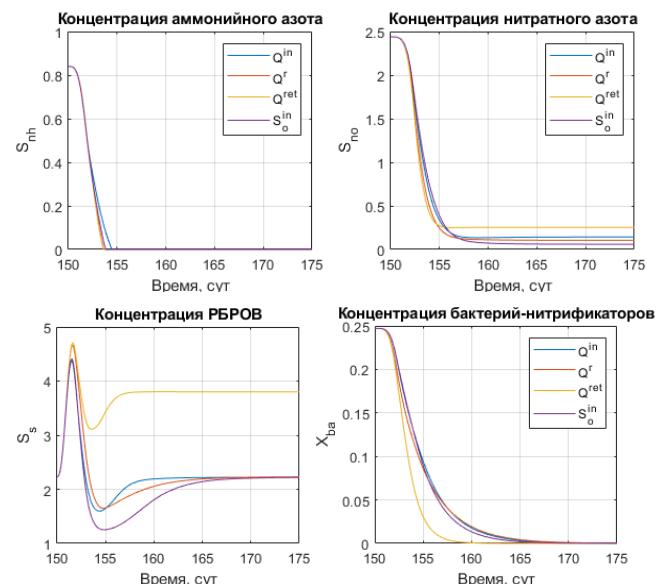


Рис. 15. Регулирование системы при возмущении по РОВ через различные исполнительные механизмы по e_{nh}

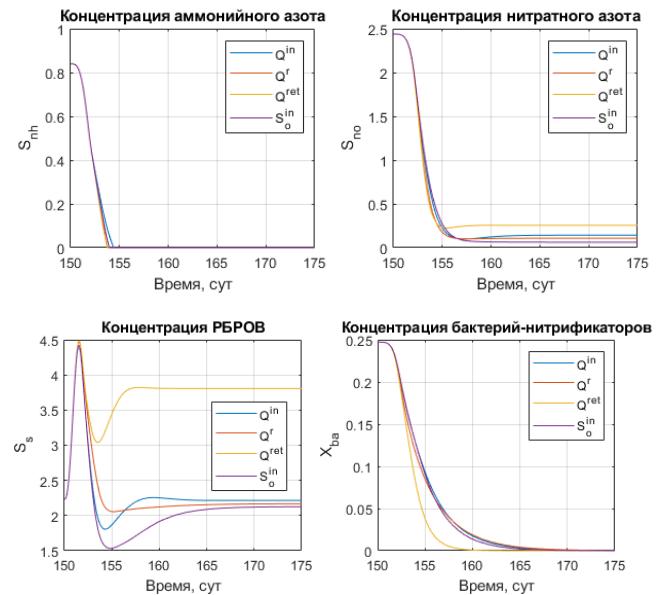


Рис. 16. Регулирование системы при возмущении по РОВ через различные исполнительные механизмы по e_{no}

На приведенном рисунке можно наблюдать, что результаты аналогичны регулированию по ошибке аммонийного азота e_{nh} в плане воздействия не только на исполнительные механизмы, но и на процессы. Единственное отличие – большие величины ошибки выходного значения РОВ.

Таким образом, в случае регулирования возмущения по РОВ удается оказывать воздействие на все исполнительные механизмы, причем вне зависимости от выбора ошибки для формирования воздействия результаты аналогичны за исключением величины отклонения установленного РОВ на выходе от значения до действия возмущения. Однако сами результаты следует считать неудовлетворительными, поскольку происходит вымывание бактерий-нитрифициаторов из системы за счет снижения аммонийного азота до нуля.

V. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АДАПТАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

Как было указано ранее, при попытке регулирования возмущения по аммонийному азоту за счет использования данных по ошибке по нитратному азоту удается до стичь удовлетворительных результатов в установившемся режиме, в то время как при переходном процессе аммонийный азот на выходе системы проходит настолько близко к ПДК, что измерительные приборы ввиду их погрешности могут выдать значение выше нормы, что является недопустимым. Таким образом данный результат был признан неудовлетворительным, причем в рассматриваемом случае И-регулирование было проведено для оказания воздействия на механизм подачи стоков на вход системы Q^{in} .

Таким образом, появляется возможность улучшить качество переходного процесса системы и тем самым добиться удовлетворительного результата для данного случая, если проводить настройку интегрального параметра не вручную, а используя адаптивное управление. Следует отметить, что существуют разные адаптивные системы и для начала ввиду поставленной задачи (проводить настройку параметра не вручную) была выбрана самонастраивающаяся беспоисковая система с эталонной моделью (в англоязычной литературе называется Model Reference Adaptive Control или MRAC). Для реализации контура адаптации было использовано правило MIT с алгоритмом нормализации, описанное в [6]. На рис. 17 приведена схема системы адаптивного управления.

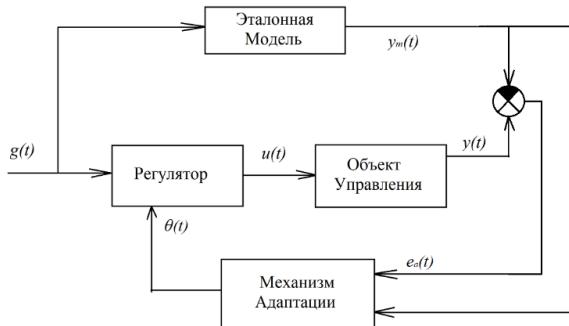


Рис. 17. Схема системы адаптивного управления

Следует отметить, что принимаемая эталонная модель (ЭМ) является линейной, данный выбор обоснован тем, что при моделировании системы зачастую переходные процессы аммонийного и нитратного азотов на выходе по своей форме напоминают соответствующие процессы линейных систем, даже учитывая тот факт, что сам объект управления (в т.ч. его математическая модель) являются нелинейными. Для учета того, что переходные процессы контролируемых параметров могут иметь в себе затухающие колебания ЭМ будет иметь второй порядок: если для оказания воздействия на входной расход Q^{in} передаточная функция ЭМ будет ЭМ1 (переходный процесс без колебаний), то для оказания воздействия на рециркуляционный расход Q^r и подачу кислорода в зону нитрификации S_o^{bx} функция ЭМ будет ЭМ2 (переходный процесс с затухающими колебаниями). Передаточные функции ЭМ1 и ЭМ2 приведены в уравнении (1):

$$W_{EM1} = \frac{60}{s^2 + 15s + 60}, \quad (1)$$

$$W_{EM2} = \frac{60}{s^2 + 5s + 60},$$

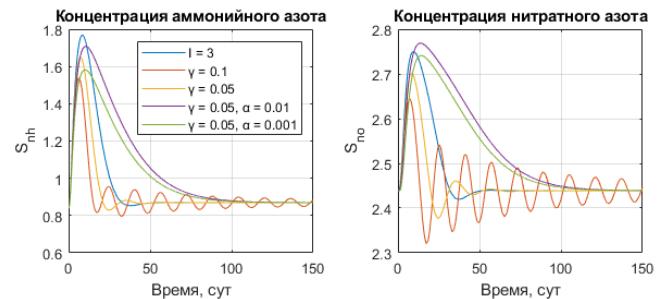


Рис. 18. Регулирование системы при возмущении по аммонийному азоту через Q^{in} по e_{no}

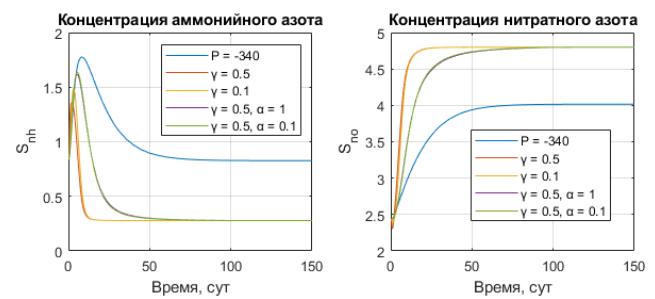


Рис. 19. Регулирование системы при возмущении по аммонийному азоту через Q^r по e_{no}

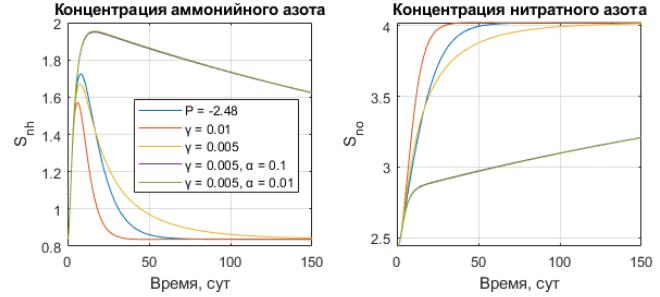


Рис. 20. Регулирование системы при возмущении по аммонийному азоту через S_o^{bx} по e_{no}

На рис. 18-20 приведены переходные процессы в системе с применением механизма адаптации для трех управляющих величин в зависимости от параметров адаптации.

Как можно наблюдать на рис. 18, при оказании воздействия на входную подачу стоков Q^{in} за счет применения нормализованного правила МИТ с параметрами $\gamma = 0.05, \alpha = 0.001$ (параметр γ отвечает за скорость изменения параметра регулятора в зависимости от ошибки между ЭМ и объектом управления, а параметр α – поправочный коэффициент, который присутствует только в случае выбора правила МИТ с нормализацией) удается снизить перерегулирование настолько, чтобы с учетом аммонийного азота не превышал скорректированный ПДК в переходном процессе. Рис. 19, 20 же демонстрируют, что если при ручной настройке для рециркуляционного потока между зонами Q^r и подачи кислорода в зону нитрификации S_o^{bx} удавалось подобрать только пропорциональный коэффициент, то за счет введения

контура адаптации удается произвести настройку интегрального коэффициента и тем самым уменьшить ошибку e_{nh} (рис. 19) или повысить быстродействие переходного процесса (рис. 20). Причем для данных двух случаев достаточно правила МИТ без нормализации.

Таким образом, для рассмотренного случая за счет применения контура адаптации с ЭМ удается производить настройку интегрального коэффициента, удовлетворяющую поставленную требованиям, в то время как сделать аналогичную ручную настройку является затруднительным.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований модели трехзонного реактора с мембранным блоком на предмет изменения входных концентраций стоков (действия т.н. возмущений) было выяснено, что в системе действительно существуют режимы, когда изменение той или иной концентрации на входе приводит к необходимости регулирования. Причем для рассмотренных случаев зачастую удается реализовать компенсацию возмущения путем оказания воздействия только по одной управляемой величине за счет информации только об одном контролируемом параметре, в то время как в системе имеется всего четыре исполнительных механизма и два контролируемых параметра.

Также, для определенных случаев, где удается достичь удовлетворительных результатов в установившемся режиме, но не в переходном процессе, было рассмотрено применение самонастраивающейся беспоисковой системы с эталонной моделью путем адаптации интегрального параметра регулятора, что позволило получить не только удов-

летворительное качество переходного процесса, но и провести настройку интегрального коэффициента для случаев, где ранее это было трудно провести вручную, из-за чего выбор останавливался только на П-регулировании.

Таким образом, удалось обеспечить допустимые концентрации на выходе системы в широком диапазоне загрязнений на входе и за счет полученных результатов в дальнейшем можно перейти к использованию многомерного регулирования для модели ASM1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.В. Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова [Электрон. журн.]. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. – С. 8-11. – Режим доступа к журн. – <https://vavilovschool.etu.ru/assets/>.
2. files/2021/sbornik_2021.pdf (дата обращения 20.07.2024)
3. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G. v. R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1. London: IAWPRC, 1987.
4. Андреев А.В., Грудяева Е.С., Душин С.Е. Исследование биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ Агро» по компьютерным моделям // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 27 сентября-01 октября 2022 года. – Нижний Архыз, 2022. – С. 16-21.
5. ГОСТ 16887-71. Разделение жидких неоднородных систем методами фильтрования и центрифугирования. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
6. Грудяева Е.К., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – 231 с.
7. Сайт издательства RIP // Research Inida Publications. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ripulation.com/aeee/62_pp%20%20%20477-484.pdf (дата обращения 20.07.2024).

Проект по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях, проблемы и перспективы реализации на примере САО РАН

Коргин Николай Андреевич
Институт проблем управления
им. В.А.Трапезникова РАН,
МФТИ
Москва , Россия
nikolay@korgin.ru

Мещеряков Роман Валерьевич
Институт проблем управления
им. В.А.Трапезникова РАН
Москва , Россия
mrv@ieee.org

Верич Юрий Борисович
Специальная астрофизическая
лаборатория РАН
Нижний Архыз, Россия
verich@sao.ru

Аннотация. Доклад посвящен описанию текущего состояния дел в проекте исследований по отработке сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях для решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок и перспективы его дальнейшего развития на примере работ, проведенных на базе САО РАН в 2023-2024 гг..

Abstract. The paper highlights the current state of affairs in the research project on the development of scenarios for the use of heterogeneous groups of electric vehicles in difficult climatic and landscape conditions to solve the problems of ensuring the conduct of field research in the interests of scientific organizations and the operation of the instrumentation base of unique scientific installations and the prospects for its further development using the example of works conducted at the SAO RAS in 2023-2024.

Ключевые слова: электротранспорт, групповое управление, организационно-техническая система, центр коллективного пользования.

Keywords: electric transport, group control, organizational and technical system, shared use center.

I. ВВЕДЕНИЕ

Проект по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях был инициирован под эгидой центра интеллектуальных робототехнических систем ИПУ РАН в 2023 году при частичной поддержке РНФ по результатам серии полевых испытаний опытных платформ малогабаритного транспортного средства повышенной проходимости на элек-

троприводе, предназначенного для передвижения по снежному покрову [1]. Опытные образцы подобных транспортных средств (рис. 1) разрабатываются отечественными промышленными партнерами ИПУ РАН в рамках разветвленной сети научной и академической коллегии [2], а их апробация проходит в географических локациях со сложными климатическими и ландшафтными условиями – в высокогорных районах Кавказа и горных регионах Заполярья, где размещаются как уже существующие объекты научной инфраструктуры КБНЦ РАН, КНЦ РАН и САО РАН, так и планируемые к созданию, такие, как международная арктическая станция «Снежинка» на Полярном Урале [3].



Рис. 1. Опытные образцы малогабаритных транспортных средств повышенной проходимости на электроприводе, предназначенные для передвижения по снежному покрову – двухколейный «утилитарный снегоход и одноколейный «снегоцикл»

В докладе описываются полевые выезды в рамках проекта в течении 2023-2024 года к БТА САО РАН, перечисляются их основные результаты, обсуждаются дальнейшие направления развития проекта применительно к САО РАН.

II. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТА

В рамках первого этапа проекта в соответствии с предложенным в [1] подходом управления распределённой организационно-технической системой производилось формирование:

- 1) Концепции распределенной сети полигонов (далее – РСП) как центров коллективного пользования на базе существующей инфраструктуры научных организаций, включая ее информационную модель.
- 2) Реестров:
 - a. опытных транспортных платформ и демонстраторов технологий;
 - b. технологий фиксации результатов эксперимента;
 - c. сценариев применения гетерогенных транспортных систем.

Проводился анализ возможностей материально-технической базы задействованных организаций – ИПУ РАН, КНЦ РАН (Мурманская область), КБНЦ РАН (КБР), САО РАН (КЧР) для решения задач обеспечения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе и допустимых режимов ее использования.

В качестве пилотной группы гетерогенных транспортных средств использовалось сочетание из нескольких легких транспортных средств, передвигающихся по снежному покрову (т.н. снегоциклы), созданного на их основе снегохода двухколейной компоновки, БПЛА различной грузоподъёмности, осуществляющих задачи навигации, регистрации движения и ретрансляции информации в интересах всей группы ТС (в тех регионах, где это было разрешено текущим законодательством). Кроме того, в ряде сценариев группа дополнялась ТС повышенной грузоподъёмности, выступающим в роли «носителя» снегоциклов.

Инфраструктура ИПУ РАН была рассмотрена, как отдельный элемент РСП, на котором проводилась апробация сценариев регистрации характеристик движения опытных транспортных платформ (далее – ОТП) – снегоциклов, по снежному покрову как с помощью объектов измерительной инфраструктуры, размещаемой непосредственно на борту ОТП, так и с помощью БПЛА, осуществляющего сопровождение и запись движения ОТП.

В частности, на примере ИПУ РАН в соответствии с информационной моделью (далее – ИМ), были определены объекты материально-технической базы (далее – ОМТБ), пригодные для обеспечения задач хранения и обслуживания ОТП и зоны территории, пригодные для проведения эксперимента – территории, на которых осуществляется снегонакопление в зимний период времени и отсутствует движение иных транспортных средств.

В качестве локальных сценариев рассматривалась задача определения погрешности перемещаемых объектов измерительной инфраструктуры (далее – ОИИ), таких, как GNSS приемники и IMU датчики [4–6] за счет привязки к территории, для которой существуют высокоточные цифровые двойники в системе виртуального моделирования, разрабатываемой специалистами ИПУ РАН [7], методами визуальной одометрии и сравнения

данных, получаемых с исследуемых ОИИ в режиме синхронизации с базовой станцией RTK, функционирующей на базе ИПУ РАН и без.

В рамках проекта в течении 2023-2024 гг. была осуществлена серия полевых выездов:

- 1) К существующим объектам научной инфраструктуры, БТА САО РАН, КБНЦ РАН и КНЦ РАН.
- 2) К перспективным месторасположению международной арктической станции «Снежинка» на Полярном Урале и водородному полигону на базе СКБ САМИ ДВО РАН.
- 3) Для участия в межведомственных опытно-исследовательских учениях «Безопасная Арктика 2023», организованных МЧС России.

В ходе полевых выездов производилась отработка целого спектра сценариев применения гетерогенных групп ТС с электрическим приводом и сбор данных для их дальнейшего анализа:

- применения легких внедорожных транспортных средств для перемещения по снежному покрову, на примере снегоциклов и снегоходов, для решения задач обслуживание инфраструктуры уникальных приборных установок в зимний период;
- групповое движение ОТП и ОТИ в сопровождении БПЛА с целью создания цифровой модели рельефа;
- поддержка проведения научных полевых исследований снежного покрова совместно с представителями ИГРАН;
- сопровождения и навигация колонны тяжелых ТС с помощью легкого ТС с электрическим приводом с целью оптимизации маршрута движения в условиях ограниченной видимости и динамически изменяющегося снежного покрова;
- базирование и обслуживание ОТП - легкого ТС с электрическим приводом на базе ОТИ в условиях низких температур и ограниченной мощности доступной для восполнения запаса электроэнергии в батареях ОТП.

III. ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ НА БАЗЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ БТА САО РАН

В 2023 году специалистами ИПУ РАН и САО РАН проводился анализ возможностей материально-технической базы (далее – МТБ) САО РАН для решения задач обеспечения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе и допустимых режимов ее использования.

В рамках полевого выезда к объектам МТБ БТА, основной уникальной приборной установки САО РАН, проводилась апробация сценариев:

- 1) Применения легких внедорожных транспортных средств для перемещения по снежному покрову, на примере снегоциклов, для решения задач обслуживания инфраструктуры БТА в зимний период.

- 2) Проведения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе, предназначенных для перемещения по снежному покрову в условиях сложного рельефа.

По результатам полевого выезда были определены ОМТБ, пригодные для обеспечения задач хранения и обслуживания ОТП и зоны территории, пригодные для проведения экспериментов, и ОМТБ, для обслуживания которых целесообразно применение исследуемых ОТП. В частности, по результатам анализа была обоснована целесообразность проведения ряда мероприятий по модернизации отдельных помещений технического блока БТА, не используемых в настоящее время в связи с повышением энергоэффективности систем БТА и значительным уменьшением размеров систем управления БТА в рамках технологического прогресса. В тоже время, электрические мощности и технический парк оборудования, размещенного непосредственно у БТА позволяет осуществлять зарядку и хранение значительного парка электрических ОТП, что актуально для проведения полевых экспериментов по групповому движению внедорожных транспортных платформ на электрическом приводе.

По результату проведенного анализа ОМТБ было принято решение о сооружении изолированного бокса, позволяющего поддерживать необходимый температурный диапазон для комфортного обслуживания и хранения техники.

Были проведены следующие работы:

- расчистка части площадей технического блока необходимой для размещения бокса;
- вывоз мусора;
- подготовка помещения к монтажу изолированного бокса;
- монтаж электропроводки с учётом мощности планируемых к размещению потребителей;
- монтаж освещения;
- монтаж стен с использованием витражных групп на алюминиевой раме (оставшихся после модернизации основного помещения БТА);
- монтаж потолка с его последующим утеплением;
- монтаж раздвижной системы ворот для проезда техники.

По результатам анализа территории БТА САО РАН, и прилегающих территорий, было определено:

- непосредственно территория САО РАН (рис. 2, участок 6), исключающая доступ сторонних ТС и посторонних лиц, пригодная для проведения полевых испытаний группировок ОТП и размещения высокоточных ОИЙ;
- территории, прилегающие к территории САО РАН, с участками сложного рельефа и отсутствующими очагами лавинной опасности, которые в зимний период не используются для народнохозяйственной деятельности – участки 432/4, 205/1, 205/2, 195 и 379 (рис. 2), общей площадью более 20 га, на которых возможна регистрация движения группировок ОТП с применением ОИЙ, размещаемой на участке 6.

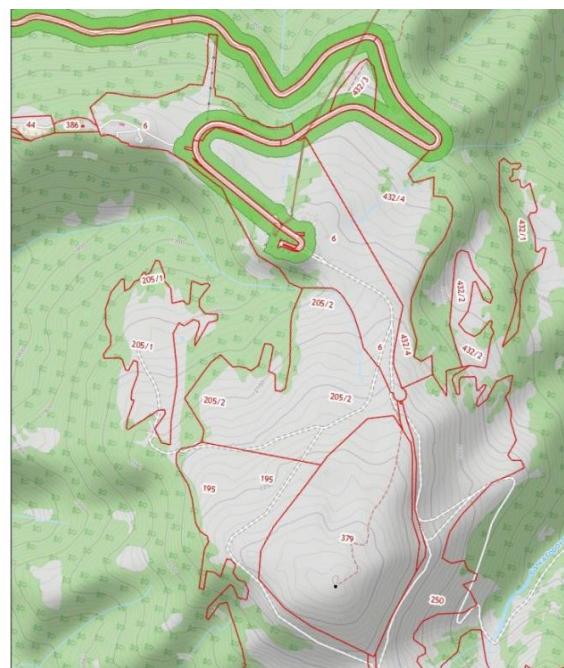


Рис. 2. Территориальная схема в районе БТА САО РАН

В качестве локальных сценариев были рассмотрены задачи доступа к удаленным объектам инфраструктуры БТА – насосным станциям и накопительному резервуару. В зимнее время транспортная доступность к данным объектам затруднена, а регулярная расчистка маршрута не целесообразна в силу отсутствия необходимости регулярного посещения данного объекта и значительного переноса снежных масс в силу особенностей рельефа. Определены основные параметры маршрутов – протяженность маршрута, профиль, ориентировочное время в пути (рис. 3). Подготовлены видео и фотоматериалы, картографические материалы с указанием координат и описаний объектов, особенностей обслуживания. Смоделированы основные сценарии аварийных ситуаций на объектах. Для них определен объем и состав транспортируемого груза, необходимого для устранения аварии.



Рис. 3. Схема движения к насосной станции БТА САО РАН в зимних условиях

В качестве ограничений по режиму использования выделены:

- 1) Запрет на проведение экспериментов в темное время суток, для исключения светового воздействия на уникальную научную установку во время ее функционирования.

- 2) Ограниченностю возможности применения БПЛА из-за особенности ветровых условий и рельефа местности в зимний период.
- 3) Ограниченный период наличия устойчивого снежного покрова.

На основе проведенного анализа, с учетом перечисленных выше ограничений, был сделан вывод о перспективности применения инфраструктуры обслуживания уникальной приборной установки БТА, как центров коллективного пользования (ЦКП) объектами экспериментально-стендовой и полигонной базы для решения задач экспериментальной проверки решений по управлению распределенными организационно-техническими системами, образуемыми гетерогенными группами подвижных объектов при движении по снежному покрову.

В рамках полевого выезда 2024 г. была проведена апробация ОМТБ, подготовленных специалистами САО РАН для хранения и обслуживания парка ОТП.

В рамках решения задач обслуживания инфраструктуры БТА в зимний период был осуществлен пробный выезд к нижней насосной станции с участием представителей инженерно-технического персонала САО РАН (рис. 4)



Рис. 4. На нижней насосной станции БТА САО РАН

В рамках отработки концепции «vehicle-to-grid» (V2G) применения электрического транспорта как источников питания в сети [8], в условиях отсутствия линий электропередач, связывающих объекты микрогрид, были проведены пробные работы по обслуживанию ОМТБ с применением электрического инструмента, питаемого от энергосистемы ОТП (рис. 5).



Рис. 5. Электрический транспорт как элемент энергосистемы для труднодоступной местности

Был проведен эксперимент по использованию ОТП как источников резервного питания для помещений технического блока, что в настоящее время является крайне актуальным направлением исследований для поселений в географических локациях со сложными климатическими и ландшафтными условиями, см., например, [9], являясь крайне существенным дополнением к моделированию электротранспорта «последней мили» в арктических условиях в рамках концепции «Теплого города», см., например, [10].

По направлению проведения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе, предназначенных для перемещения по снежному покрову в условиях сложного рельефа, исследователями ИПУ РАН была реализована серия экспериментов исследователями ИПУ РАН на основе сценариев, отработанных на территории ИПУ РАН в 2023 г (рис. 6).



Рис. 6. Сбор данных на территории БТА САО РАН

Был осуществлен сбор данных для исследования методов повышение степени автономности информационной системы для динамических объектов с бортовыми навигационными комплексами [5, 6], в частности, за счет улучшения методов позиционирования ОПТ (рис. 7).



Рис. 7. Эксперимент по повышению степени автономности информационной системы для динамических объектов с бортовыми навигационными комплексами

С применением снегоцикла одноколейной компоновки был осуществлен сбор данных по регистрации движения тела человека при управлении ТС сопоставимыми с ним по массе [11, 12] с использованием ОИИ как стационарного базирования, так и на вспомогательных ОТП (рис 8). Математическое моделирование и анализ эффективности управления такими объектами затрудняется тем, что необходимо учитывать движения самого субъекта, пилотирующего данный объект, которые часто имеют сложную динамику.



Рис. 8. Сбор данных по регистрации движения тела человека

IV. ДАЛЬНЕЙШИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТА В КОНТЕКСТЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С САО РАН

По результатам проекта в 2023 и первой половине 2024 года можно с уверенностью утверждать, что на базе инфраструктуры БТА САО РАН был реализован полноценный пилот отдельного узла распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях.

Созданная инфраструктура базирования и обслуживания ОТП с электрическим приводом позволит в дальнейшем осуществлять проведение полевых исследований не только с парком ТС, доставляемых к месту проведения экспериментов, но и размещаемых в данном узле на постоянной основе. В случае БТА, возможность постоянного базирования и обслуживания ОТП является особенно актуальной, так как в рамках проекта был определен целый ряд сценариев применения подобной техники для решения задач обслуживания инфраструктуры уникальных приборных установок. Причем не только в зимний период – задачи из области V2G, такие как автономное питание электрического инструмента при обслуживании объектов, расположенных в труднодоступной местности или обеспечения резервного бесперебойного питания БТА – крайне актуальной задачи в контексте настоящего состояния энергосистемы региона расположения объекта.

Кроме того, перспективным направлением дальнейшего развития исследований в сфере разработки, апробации и внедрения интеллектуальных технологий управления элементами научно-технической инфраструктуры и приборной базы уникальных научных установок с целью повышения энергоэффективности и минимизации воздействия на окружающую среду может являться проект по организации членочной связи п. Нижний Архыз с БТА за счет дорожных ТС с электрическим приводом – там где сейчас применяется парк «классических» автомобилей с ДВС.

При этом, возможность постоянного базирования и проведения экспериментов с гетерогенным группами ОТП с электрическим приводом на базе инфраструктуры БТА в совокупности с ее изолированностью и компактностью размещения открывает возможность ее применения не только по своему основному назначению, в области астрономических наблюдений. Но и междисциплинарного, в других отраслях науки, в частности – теории управления, по вопросам исследования проблем

функционирования гетерогенных групп подвижных транспортных средств, как в формате колаборативного взаимодействия на уровне человек – автономное транспортное средство и в формате смешанных групп, так и гетерогенных групп мобильных роботов [13]. БТА может потенциально рассматриваться как крупный объект научной инфраструктуры или центр коллективного пользования для более широкого перечня отраслей науки в конкурсах Российского научного фонда и других грантовых программах.

За счет расширения парка ОТП, доступных для исследования в рамках проекта РСП благодаря сотрудничеству с МФТИ по теме «Разработка, апробация и внедрение интеллектуальных технологий управления объектами и уникальной инфраструктурой в области автономных и полуавтономных транспортных средств с электрическим приводом и полигонов для их испытаний с целью повышения энергоэффективности и минимизации воздействия на окружающую среду», объектами с многомоторной схемой силового привода и возможностью эксплуатации не только в зимний сезон, становится возможной апробация наработок специалистов ИПУ РАН по управлению многомоторными подвижными объектами с электрическим приводом на данных платформах, см., например, [14].

Отдельно следует выделить проблематику одновременного создания цифровых двойников как подвижных объектов, так и среды, в которой осуществляется движение объекта, для чего планируется интеграция массива собираемых в рамках проекта данных в среду виртуального моделирования, развивающуюся в ИПУ РАН [7]. Это позволит в дальнейшем проводить анализ и сопоставление плановых и реализованных траекторий движения гетерогенных групп подвижных объектов в гетерогенных средах.

Совокупность проводимых исследований в дальнейшем позволит получить данные для разработки систем-управления движения легких ТС (чей вес сопоставим с весом человека) в автономных и полуавтономных режимах в условиях сложной поверхности и рельефа. В рамках проекта было определено, что, несмотря на значительное расстояние между планируемой к созданию международной арктической станцией «Снежинка», планируемой к созданию на Полярном Урале [3] и территорией размещения БТА, есть много общих характеристик с точки зрения климата и рельефа, что делает актуальным на период строительства первого объекта, развертывание полигона по отработке отдельных элементов научной программы и сценариев эксплуатации объектов научной инфраструктуры на базе БТА.

Следующим немаловажным направлением, в котором активно функционирует в настоящее время САО РАН, является просветительская деятельность. Дополняя и диверсифицируя образовательные и популяризационные мероприятия в области астрономии комплиментарными направлениями, в нашем случае – созданием тестово-ознакомительной площадки для внедорожных экспериментальных транспортных платформ с электрическим приводом. Создание подобной площадки может быть очень перспективным и актуальным проектом в области экологического просвещения населения и развития электротранспорта на территории РФ.

БЛАГОДАРНОСТИ

В ключе результатов, полученных в рамках проекта на базе САО РАН и дальнейших перспектив его развития особую благодарность следует выразить руководству САО РАН, в первую очередь, директору Валевину Г.Г. и заместителю директора Валееву А.Ф., курирующего наш проект, которые, несмотря на исключительную междисциплинарность предложенного исследования, поверили в его перспективность и оказали всемерную поддержку. А также, техническому персоналу БТА САО РАН, в первую очередь, ведущему инженеру Макову А.С. и инженеру Книгиницкому И.В., принимавшим непосредственное участие в подготовке ОМТБ и апробации сценариев решения задач обслуживания инфраструктуры уникальных приборных установок в зимний период.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коргин Н.А., Мещеряков Р.В. Концепция проекта по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях // Труды 11-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сборник научных трудов (п. Нижний Архыз, ССПС-2022). – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2022. – С. 197-202.
2. Кравчук С.Г., Коргин Н.А., Клюсов Н.В., Гарин Н.П. Проектно-образовательный эксперимент в арктическом дизайне: формирование облика инновационного снегоходного транспорта // Техническая эстетика и дизайн исследования. – 2023. – Т. 5, № 1. – С. 56-68.
3. Васильев Ю.В. Арктический полигон водородных технологий "Снежника" // Топливные элементы и энергоустановки на их основе: ДЕВЯТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ, Черноголовка, 20–23 июня 2022 года. – Черноголовка: Издательство Черноголовка, 2022. – С. 12.
4. Морозов Ю.В., Коргин Н.А. Особенности постобработки GNSS позиции на электрическом снегоходе одноколейной компоновки при движении по снегу // Труды XVI Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2023). – 2023. – С. 195-197.
5. Трефилов П.М., Романова М.А. Формирование достоверной навигационной информации в задачах ориентации и навигации автономных робототехнических устройств с использованием инфраструктуры интеллектуальной транспортной среды // Управление большими системами: сборник трудов. – 2023. – Вып. 106. – С. 71-95.
6. Трефилов П.М., Коргин Н.А. Повышение степени автономности информационной системы для динамических объектов с бортовыми навигационными комплексами // Сборник докладов XIV Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024). – 2024. – С. 1270-1274.
7. Трефилов П.М., Кулагин К.А., Мамченко М.В. Developing a Flight Mission Simulator in the Context of UAVs GroupControl // Proceedings of the 13th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). – Moscow: IEEE, 2020. C. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9247692>.
8. Joseph A., Balachandra P. Energy internet, the future electricity system: Over-view, concept, model structure, and mechanism // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 16. – С. 4242.
9. Brendal B. et al. E-Mobility and Batteries—A Business Case for Flexibility in the Arctic Region // World Electric Vehicle Journal. – 2023. – Vol. 14, No. 3. – Р. 61.
10. Прокопова С.М. «Теплый город» в Арктике: адаптация, оптимизация феноменология // Архитектон: известия вузов. – 2022. – № 2 (78).
11. Базенков Н.И. Моделирование движений человека: методы и актуальные задачи // Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 295-300.
12. Базенков Н.И., Пыжсянов А.А. Система сбора данных для реконструкции движения мотоциклиста // Сборник докладов XIV Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024). – 2024. – С. 1961-1964.
13. Бирин Д.А., Мещеряков Р.В., Туровский Я.А. Проблемы управления группой РТК // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). – 2023. – С. 287-290.
14. Alexandrov V. et al. Frequency Domain Identification of the Quadcopter Attitude Dynamics // Advances in Systems Science and Applications. – 2023. – Vol. 23, No 3. – P. 1-15.

Сравнительный анализ характеристик мониторинга технологического процесса с использованием линейного и нелинейного метода главных компонент

Ковалёв Дмитрий Александрович
Высшая школа технологии
и энергетики
Санкт-Петербургский
государственный университет
промышленных технологий
и дизайна
Санкт-Петербург, Россия
d.a.kovalyov@yandex.ru

Русинов Леон Абрамович
Факультет информационных
технологий и управления
Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
lrusinov@yandex.ru

Куркина Виктория Вадимовна
Факультет информационных
технологий и управления
Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
victoria.kurkina@gmail.com

Вакуленко Дмитрий Юрьевич
Факультет информационных
технологий и управления
Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
lrusinov@yandex.ru

Аннотация. Задача раннего обнаружения возможных нештатных ситуаций для потенциально опасных технологических процессов (ПОТП) является актуальной ввиду того, что вовремя нераспознанное развитие многих нештатных ситуаций может привести к серьезным последствиям. В результате исследования выполнено сравнение характеристик мониторинга на базе линейного и нелинейного МГК по набору параметров для ПОТП подсистемы зеленого и белого щелока содорегенерационного котлоагрегата.

Abstract. The task of early detection of possible abnormal situations for potentially hazardous technological processes (PHTP) is urgent, due to the fact that in time unrecognized development of many abnormal situations can lead to serious consequences. As a result of the research the characteristics of monitoring on the basis of linear and nonlinear PCA on a set of parameters for PHTP of green and white liquor subsystem of recovery boiler unit were compared.

Ключевые слова: мониторинг технологического процесса, линейный и нелинейный метод главных компонент, нештатная ситуация, содорегенерационный котел, подсистема зелёного и белого щелока.

Keywords: process monitoring, linear and nonlinear principal component analysis, contingency situation, recovery boiler, green and white liquor subsystem.

I. ВВЕДЕНИЕ

В химической промышленности большое количество технологических процессов относятся к классу потенциально опасных (ПОТП). Для раннего обнаружения возможных нештатных ситуаций на таких процессах, что необходимо, т.к. вовремя нераспознанное развитие многих нештатных ситуаций может привести к серьезным последствиям, используются статистические методы

контроля, к которым, например, относятся многомерные карты Шухарта [1, 2]. Это подтверждается также тем, что большинство ПОТП характеризуется большим количеством технологических параметров и плохо описываются математическими моделями, особенно для предаварийных и нештатных режимов. Однако, при применении таких карт возникают сложности их построения для задач большой размерности с существенной взаимной корреляцией между переменными.

Для снижения размерности можно использовать метод главных компонент (МГК), позволяющий перейти к новому меньшему ортогональному базису без существенных потерь в точности статистической модели и провести мониторинг, контролируя всего две статистики [3–5]. К сожалению, большинство ПОТП нелинейны, поэтому традиционное применение для мониторинга линейного МГК может привести к ложным срабатываниям системы мониторинга или к позднему обнаружению нештатной ситуации и, что еще хуже, к ее необнаружению (пропуску события).

Однако, независимо от каких-либо модификаций алгоритма вычислительная нагрузка любого метода, основанного на керн-МГК, всегда больше, чем при использовании стандартного линейного МГК [6, 7]. Поэтому важно сравнить возможности использования для мониторинга процессов линейного и нелинейного вариантов МГК. В работе [7] проводилось исследование моделей, полученных на базе линейного и нелинейного МГК, но оценивалась предсказательная способность таких моделей. Сравнение возможностей линейного и нелинейного МГК было проведено в работе [8] на примере нелинейного технологического процесса пиролиза бензинов.

В данной работе сравнение характеристик мониторинга на базе линейного и нелинейного МГК проведено по более широкому набору параметров для подсистемы зеленого и белого щелока содорегенерационного котлоагрегата (СРК). В баке-растворителе плава (СРК) полученный в результате сжигания черного щелока плав растворяют в слабом белом щелоке, который подают с фильтров промывки известкового шлама (рис. 1). Пере-мешанный раствор плава в слабом белом щелоке называют зеленым щелоком.

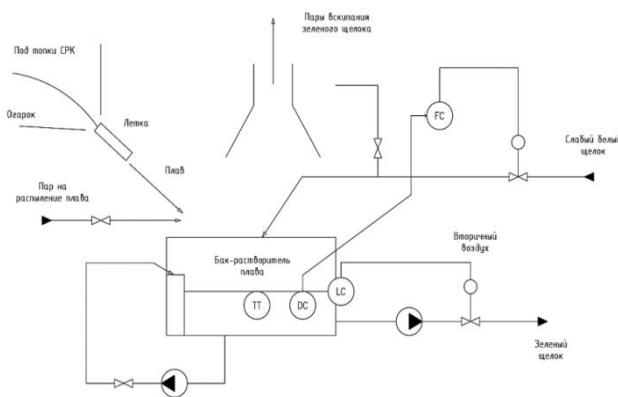


Рис. 1. Технологическая схема бака-растворителя плава

II. НЕЛИНЕЙНЫЙ МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Прежде, чем переходить к нелинейному методу главных компонент (НМГК) рассмотрим линейный вариант МГК. Метод обеспечивает существенное снижение размерности исходной задачи за счет перехода в пространство главных компонент, являющихся в некотором смысле интегральными показателями исходных параметров диагностируемого ПОТП. Основное достоинство метода это снижение размерности, которое достигается переходом в пространство главных компонент и ограничением их количества, объясняющим 90-95% дисперсии исходных переменных [3] остальные главные компоненты считаются образованными шумом и игнорируются. Преимуществом использования МГК является возможность проведения обнаружения с помощью всего двух статистик: статистики Хотеллинга T^2 (контролирует допустимые отклонения процесса в рамках модели МГК) и Q-статистики (квадрата ошибки прогнозирования SPE, представляющей собой сумму квадратов невязок – квадратов разностей между наблюдаемыми значениями и предсказанными номинальной моделью). Нештатная ситуация считается обнаруженной, когда по крайней мере одна из статистик превысит свой порог.

Основная идея НМГК состоит в первоначальном отображении входного пространства размерности m в так называемое линеаризующее пространство (feature space) F_h большой размерности h с помощью нелинейного преобразования ($x_j \in \mathbb{R}^m \rightarrow \Phi(x_j) \in F_h$), а затем в вычислении главных компонент уже в пространстве F методом линейного МГК [8, 9].

Выборочная ковариация данных в пространстве F будет иметь вид:

$$C^F = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Phi(x_j) \Phi(x_j)^T. \quad (1)$$

Предполагается, что исходные данные центрированы $\sum_{k=1}^n \Phi(x_k) = 0$ и Φ – нелинейная функция, которая отображает входные векторы из входного пространства \mathfrak{X} в пространство F .

Как и в случае линейного МГК главные компоненты находятся, как собственные векторы $v \in F$ ковариационной матрицы C^F вместе с собственными числами λ (v вместе с наибольшим λ становится первой главной компонентой):

$$\lambda v = C^F v = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Phi(x_j, v)) \Phi(x_j), \quad (2)$$

где λ – собственные числа ($\lambda \geq 0$), $(\Phi(x_j, v))$ – скалярное произведение между $\Phi(x_j)$ и v . Из (2) следует, что собственные векторы v могут быть представлены линейными комбинациями преобразованных значений входных данных. Так как $(\Phi(x_j, v))$ – скаляр, то все значения v с $\lambda \neq 0$ лежат в интервале $\Phi(x_1), \Phi(x_n)$ и существуют коэффициенты α , такие что:

$$v = \sum_{j=1}^n \alpha_j \Phi(x_j). \quad (3)$$

Умножая на $\Phi(x_j)$ слева обе части выражения (2) с учетом выражения (3), получим:

$$\lambda \alpha = \frac{1}{n} K \alpha, \quad (4)$$

где K – матрица скалярных произведений с элементами $K_{jk} = (\Phi(x_j) \Phi(x_k))$.

Для центрирования матрицы K используется выражение:

$$\bar{K} = K - KE - EK - EKE. \quad (5)$$

Далее отображение данных в линеаризующем пространстве F будет эквивалентно нахождению собственных векторов с собственными числами. Размерность задачи можно снизить посредством использования только первых q собственных векторов. При этом коэффициенты $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q)$ нормализуются так, чтобы $(v_r, v_r) = 1$ для $r \in [1, q]$.

Тогда проекции $t = [t_1, \dots, t_q]$ текущего вектора x на главные компоненты получаются отображением $\Phi(x)$ на собственные векторы v_r в пространстве F :

$$t_r = (v_r, \Phi(x)) = \sum_{j=1}^n \alpha_{jr} (\Phi(x_j), \Phi(x)). \quad (6)$$

Для решения уравнения (4) и при проецировании данных из входного пространства \mathfrak{X} в пространство F можно избежать нелинейного отображения и расчета скалярных произведений в линеаризующем пространстве, вычислением скалярных произведений в исходном пространстве [5-7] вводя керн-функции:

$$k(x, y) = (\Phi(x), \Phi(y)). \quad (7)$$

Наиболее часто используются следующие керн-функции, удовлетворяющие теореме Мерсера:

- полиномиальное ядро:

$$k(x, y) = (x, y)^d = (x^T \cdot y + r)^d \quad (8)$$

- сигмоидное ядро (гиперболический тангенс):

$$k(x, y) = \tanh(\beta_0(x, y) + \beta_1) \quad (9)$$

- Гауссово ядро (радиальное базисное ядро):

$$k(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (10)$$

где r , d , β_0 , β_1 , σ – должны быть априорно специфицированы пользователем. Полиномиальное и Гауссово ядро всегда удовлетворяют теореме Мерсера, а сигмоидное ядро – только при определенных значениях коэффициентов β_0 и β_1 .

Для определения количества главных компонент q обычно используется критерий, определяющий долю общей дисперсии исходных данных, объясняемую базисом главных компонент. Иногда считается доля суммы учитываемых моделью МГК собственных чисел λ_i ковариационной матрицы по отношению к сумме всех собственных чисел матрицы:

$$CPV = 100 \frac{\sum_{r=1}^q \lambda_r}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \% \quad (11)$$

Если эта доля достигает 90% и более, то считается, что модель адекватно описывает корреляционные связи переменных в процессе.

Мониторинг на основе НМГК подобен мониторингу на базе линейного МГК в том, что T^2 и Q-статистики в линеаризующем пространстве интерпретируются одинаковым образом.

Состояние процесса в пределах модели НМГК контролируется статистикой T^2 – суммой нормализованных квадратичных счетов:

$$T^2 = [t_1 \dots t_q] \Lambda^{-1} [t_1 \dots t_q]^T, \quad (12)$$

где t_k рассчитываются по (7), Λ^{-1} – диагональная матрица из инверсий собственных чисел, соответствующих учитываемым в модели главным компонентам.

Пороговое значение T^2 -статистики определяется с использованием распределения Фишера:

$$C_T = \frac{q(n-1)}{n-q} F_{q, (n-q), \alpha}, \quad (13)$$

где n – число объектов в обучающем массиве, q – число главных компонент в модели, α – уровень значимости.

Определить невязки модели, характеризуемые квадратичной ошибкой предсказания (Q-статистика), в случае НМГК сложнее, т.к. непосредственно функция отображения данных из исходного пространства \Re^m в линеаризующее пространство F обычно не известна.

Одна из методик вычисления статистики Q в линеаризующем пространстве F приведена в [9, 10]. Сначала выполняется нелинейное отображение Φ входных векторов в высоко размерное линеаризующее пространство F . Далее используется линейный МГК в пространстве F для получения проекций t в q -мерном пространстве. Для восстановления вектора $\Phi(x)$ в пространстве F по полученным проекциям t проецируется в линеаризующее пространство с помощью v . Тогда для расчета Q-статистики используется следующее выражение:

$$Q = \|\Phi_p(x) - \Phi_q(x)\|^2 = \sum_{j=1}^p t_j^2 - \sum_{j=1}^q t_j^2. \quad (14)$$

Пороговые значения C_Q для Q-статистики может быть определено посредством приближения взвешенного χ^2 -распределения к опорному распределению, полученному по данным нормальной работы процесса:

$$C_Q = g\chi_h^2, \quad (13)$$

где $g = b/2a$ – весовой параметр, $h = 2a^2/b$ – число степеней свободы, a и b – оцененные среднее и дисперсия Q-статистики [10]. Использование χ^2 -распределения основано на предположении нормального распределения ошибок, что не всегда верно на практике. Однако, т.к. g и h получаются непосредственно из моментов выборочного распределения данных нормального режима работы процесса, то взвешенное χ^2 -распределение работает хорошо даже в случаях, когда распределение ошибок не соответствует Гауссовому.

III. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОГО И НЕЛИНЕЙНОГО МГК

Как уже упоминалось выше сравнение результатов мониторинга для подсистемы зеленого и белого щелока СРК линейного и нелинейного МГК (конкретнее, керн-МГК) проводилось на ПОТП производства сульфатной целлюлозы.

Для моделирования были выбраны три возможные нештатные ситуации для подсистемы зеленого и белого щелока СРК, приведенные ниже с соответствующими им основными диагностическими показателями (всего контролируется 16 параметров):

- прекращение действия распылов струи плава (увеличение плотности зеленого щелока в баке-растворителе);
- стекание сплава мимо леток (уменьшение плотности зеленого щелока в баке-растворителе, снижение температуры леток);
- отсутствие воды на охлаждение двух леток (увеличение температуры леток и уменьшение уровня воды в баке).

Предварительно были построены МГК и керн-МГК модели на первых 200 наблюдениях (обучающий набор), снятых с процесса в штатном режиме работы с интервалом в 1 минуту. В случае МГК оказалось достаточным 6 главных компонент, а при использовании керн-МГК – 9 главных компонент, в обоих случаях объясняется более 90% дисперсии входных данных. При мониторинге с помощью НМГК использовано полиномиальное ядро.

Соответственно рассчитанные пороговые значения для статистик при использовании МГК были: $C_T = 24,27$, $C_Q = 77,37$, а при использовании керн-МГК: $C_T = 32,56$, $C_Q = 8,49$.

Рассмотрим сначала результат мониторинга с помощью линейного МГК. Следует отметить, что в случае штатного режима ни одна из статистик не превысила пороговых значений, хотя даже в штатном режиме статистика T^2 в ряде случаев опасно приближалась к своему порогу.

Первая нештатная ситуация была нанесена на процесс в 5 час. 08 мин. (время условное).

На рис. 2 показаны тренды статистик T^2 и Q при мониторинге на базе МГК. Обе статистики зарегистрировали факт возникновения нештатной ситуации соответственно через 2 и 5 минут после ее возникновения.

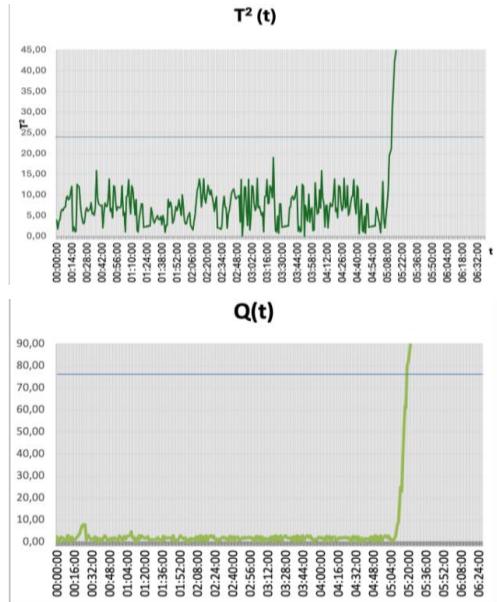


Рис. 2. Тренды статистик T^2 и Q при моделировании первой нештатной ситуации (МГК)

На рис. 3 представлены тренды статистик T^2 и Q при использовании керн-МГК. Здесь статистика Q зафиксировала факт возникновения нештатной ситуации уже через 2 минуты, а статистика T^2 значительно позже, через 25 минут. Однако важно отметить, что статистика T^2 значительно более стабильна и вероятность ложного обнаружения меньше.

На рис. 4 и 5 показаны тренды статистик T^2 и Q при моделировании второй нештатной ситуации (время возникновения 5час. 03 мин).

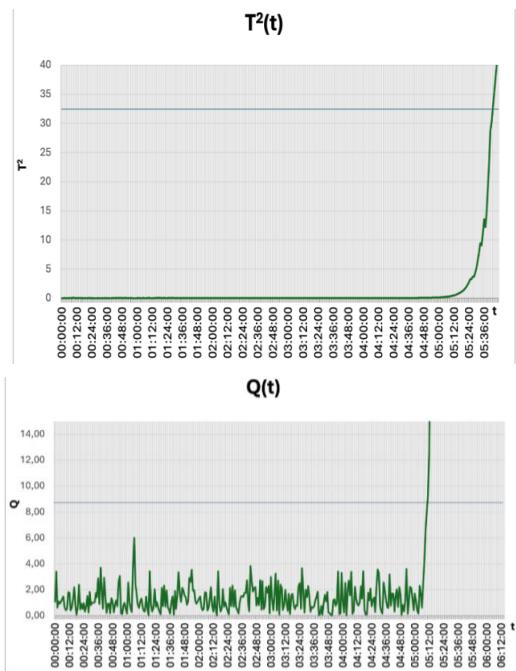


Рис. 3. Тренды статистик T^2 и Q при моделировании первой нештатной ситуации (керн-МГК)

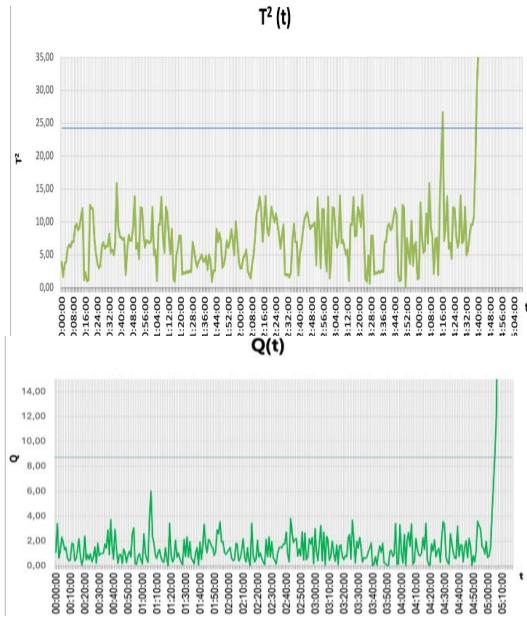


Рис. 4. Тренды статистик T^2 и Q при моделировании второй нештатной ситуации (МГК)

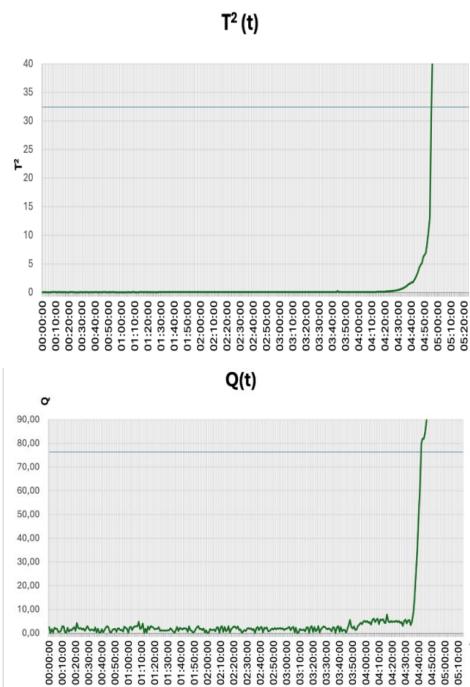


Рис. 5. Тренды статистик T^2 и Q при моделировании второй нештатной ситуации (керн-МГК)

В этом случае также в обоих случаях нештатная ситуация была обнаружена обеими статистиками, но при использовании МГК статистика Q превысила пороговое значение через 7 минут после возникновения нештатной ситуации, а статистика T^2 на 5 минут быстрее, а при использовании керн-МГК быстрее сработала статистика Q, а статистика T^2 как и при моделировании первой нештатной ситуации обнаружила ее значительно позже (через 20 минут). Но самое главное, было зафиксировано ложное срабатывание: статистика T^2 превысила порог еще при отсутствии нештатной ситуации. Данный пример показывает, что хоть мониторинг на базе линейного МГК и характеризуется более быстрым срабатыванием, он может давать ложные обнаружения при работе с нелинейными процессами.

Анализируя процедуру мониторинга по рис. 5 на базе керн-МГК можно видеть, что при относительно небольшом запаздывании в обнаружении по сравнению с линейным МГК характер трендов обеих статистик значительно более устойчив.

На рис. 6 и 7 представлены тренды при моделировании третьей нештатной ситуации.

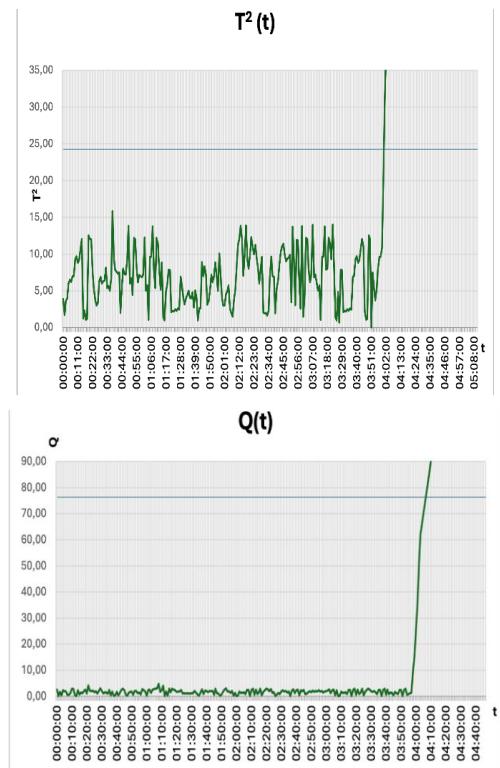


Рис. 6. Тренды статистик T^2 и Q при моделировании третьей нештатной ситуации (МГК)

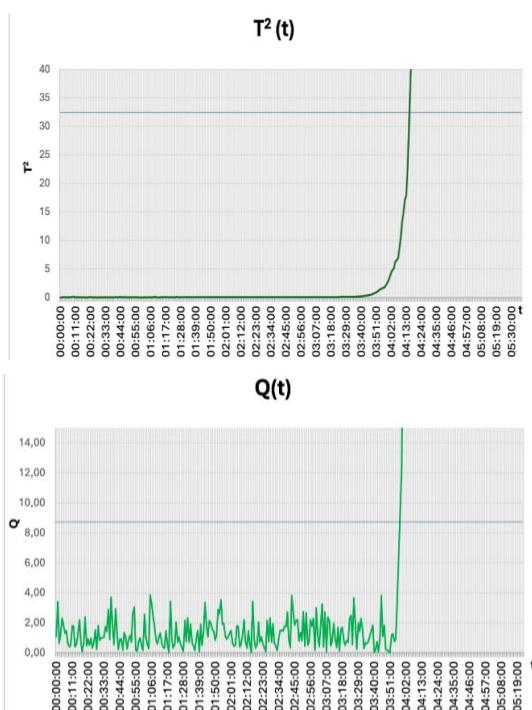


Рис. 7. Тренды статистик T^2 и Q при моделировании третьей нештатной ситуации (керн-МГК)

Таким образом, аналогично прошлым экспериментам, статистики Q (керн-МГК) и T^2 (МГК) обнаруживают нештатную ситуацию почти в одно и то же время, но тренды статистик при использовании керн-МГК значительно устойчивее. В данном случае ложных обнаружений не было.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения мониторинга состояния процесса было проведено сравнение двух методов: мониторинга на базе линейного МГК и мониторинга на базе керн-МГК подсистемы зеленого и белого щелока СРК. В обоих случаях снижается размерность задачи мониторинга, т.к. требуется контроль всего двух статистик: статистики Хотеллинга (T^2) и статистики SPE (Q).

По результатам проведенного эксперимента оба метода можно назвать быстродействующими, время на нахождение ошибки в обоих системах диагностики варьировалось в диапазоне 3-5 минут.

Наиболее быстро обнаружения можно добиться за счет наблюдения за статистиками Q у керн-МГК и T^2 у линейного МГК, однако в случае T^2 МГК было зафиксировано ложное срабатывание, что можно объяснить нелинейностью процесса, которое не учитывается в линейном МГК.

Независимо от каких-либо модификаций алгоритма вычислительная нагрузка любого метода, основанного на керн-МГК, всегда выше, чем при использовании линейного МГК. Поэтому предполагается, что исследователи могут провести проверку линейности данных до принятия решения о применении керн-МГК [7]. Кроме того, тип функции ядра и оптимальные значения параметров ядра, которые будут использоваться, также являются открытой областью исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bersimis S., Psarakis S., Panaretos J. Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview // Qual. Reliab. Engng. Int. – 2007. – Vol. 23. – P. 517-543.
2. Царев Ю.В., Тростин А.Н. Статистические методы контроля и управления качеством. Контрольные карты: учебно-методическое пособие. – Иваново: ИГХТУ, 2006. – 160 с.
3. Эбенсен К. Анализ многомерных данных. – Черноголовка: Изд-во ГЕОХИ РАН, 2005. – 158 с.
4. Yin Sh., Ding St.X., Xie X., Luo H. A Review on Basic Data-Driven Approaches for Industrial Process Monitoring // Transactions on industrial electronics. – 2014. – Vol. 61, No. 11. – P. 6418-6428.
5. Bishop C.M. A review of process fault detection and diagnosis. – N.Y.: Prentice Hall, 2000. – 175 p.
6. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N. A review of process fault detection and diagnosis. Quantitative model-based methods // Computers and Chemical Engng. – 2003. – Vol. 27. – P. 293-346.
7. Pani A.K. Non-linear process monitoring using kernel principal component analysis: A review of the basic and modified techniques with industrial applications // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2012. – Vol. 39. – P. 327-344.
8. Галиаскаров М.Р., Рудакова И.В., Русланов Л.А. Сравнительный анализ характеристик мониторинга технологического процесса с использованием линейного и нелинейного метода главных компонент // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2013. – № 22 (48). – С. 106-110.
9. Lee J., Yoo Ch.Y., Choi S.W., Vanrolleghem P.A., Lee I.B. Nonlinear process monitoring using kernel principal component analysis // Chemical Engng. Sci. – 2004. – Vol. 59. – P. 223-234.
10. Schölkopf B., Smola A.J., Müller K.-R. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem // Neural Computation. – 1998. – Vol. 10. – P. 1299-1319.
11. Choi S.W., Leeb Ch., Leeb J-M., Park J.H., Lee I-B. Fault detection and identification of nonlinear processes based on kernel PCA // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2005. – Vol. 75. – P. 55- 67.

Интервальные методы в системах управления с пьезоэлектрическим приводом и обратной связью по выходу

Светлов Михаил Семенович
Лаборатория системных проблем
управления и автоматизации
в машиностроении
Институт проблем точной механики
и управления РАН
Саратов, Россия
svetlovms@yandex.ru

Львов Петр Алексеевич
Институт электронной техники
и приборостроения
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
alvova@mail.ru

Шаронов Павел Александрович
Институт электронной техники
и приборостроения
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
stalker-scharonov@mail.ru

Балабан Олег Михайлович
Физико-технический институт
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
deadman0@yandex.ru

Мартиросян Давид Мартиросович
Институт прикладных
информационных технологий
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
deadman0@yandex.ru

Мартиросян Арман Мартиросович
Институт прикладных
информационных технологий
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
treiizer164@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются проблемы моделирования, проектирования регулятора с обратной связью по выходу и экспериментальной реализации системы управления вибрацией интеллектуальной консольной балки, когда измеряемые параметры известны с неопределенностью, представленными в интервальной форме. Интервальная модель системы получается путем внесения изменений в параметр идентифицированной модели. Однако в модели присутствуют неопределенности, выявленные с помощью оперативной рекурсивной оценки параметров по методу наименьших квадратов. Контроль и идентификация процесса осуществляется с помощью программного обеспечения для среды моделирования *Simulink* и платы контроллера DSpace DS1104. Проектирование контроллера обратной связи по выходу для интервальной модели осуществляется с использованием методологии одновременного проектирования контроллера обратной связи по выходу с учетом моделей с нижней, номинальной и верхней границами исследуемого параметра. Разработанные контроллеры с периодической обратной связью по выходу экспериментально оцениваются на предмет их эффективности для подавления режима вибрации.

Abstract. The problem of modeling, output feedback control design and the experimental implementation for the vibration control of cantilever beam under parameter uncertainties condition, which are given in interval form is discussed. The vibrating system model based on the interval mathematics is proposed by introducing variation in the parameter of the identified plant model. Uncertainties are assumed in the model, identified through on-line recursive least square parameter estimation. The control and identification procedures are carried out by using Simulink modeling software and DSPACE DS 1104 controller board. The output feedback controller design for the interval model is done through simultaneous output feedback controller methodology by considering

lower, nominal and upper bound models. The controllers designed are periodic output feedback is experimentally confirmed for their performance in suppressing the first vibration mode.

Ключевые слова: Интервальный анализ, обратная связь по выходу, пьезоэлектрик, выбирирующая консольная балка.

Keywords: Interval analysis, output feedback, piezoelectric, vibrating cantilever beam.

I. ВВЕДЕНИЕ

Целью активного контроля вибрации в технической системе является их снижение путем автоматического изменения структурных характеристик системы. Активная система контроля вибрации может быть реализована различным образом, но важными компонентами любой подобной структуры являются датчик, контроллер и исполнительный механизм. Активное управление вибрацией гибких конструкций на основе концепции интеллектуальных систем управления (*smart/intelligent control*) – это относительно новая и бурно развивающаяся область исследований [1]. В инженерной практике и множестве приложений признанной методикой исследования систем является их идентификация [2, 3]. Многими реальными системами трудно управлять и сложно моделировать происходящие в них процессы из-за неполных знаний о поведении системы и наличия только кратковременных или ненадежных выборок измеренных данных. Следовательно, неопределенность, возникающая как в результате измерения, так и в процессе моделирования, должна приниматься во внимание при составлении прогнозов поведения систем или их проектировании. Такого рода возмущения могут вносить неопределенности в идентифицированную модель пьезоэлектрических связанных структур. Ограничения

анализа неопределенности с использованием вероятностных и стохастических моделей можно увидеть в [4–10]. Интервальный анализ – это относительно новая отрасль прикладной математики [11–17]. Интервальная арифметика учитывает неопределенность всех параметров, рассматривая их как значения некоторой величины, заданные интервалами числовых значений, диапазон которых содержит неопределенности в знании этих величин. Результатирующие вычисления, рассчитанные с использованием интервальной арифметики, содержат в себе неопределенности, связанные с обработкой данных в процессе всего анализа до конечной стадии [9, 18]. Интеллектуальные конструктивные элементы, поверхности которых покрываются пьезоэлектрическими материалами из высокополимеров, описаны, например, в [19].

II. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ИНТЕРВАЛЬНОЙ АРИФМЕТИКЕ

Интервальная арифметика была предложена и использована в качестве потенциального инструмента для моделирования неопределенности, например, в работах [14, 20–22]. Этот раздел математики использует интервальные числа, которые на самом деле представляют собой упорядоченную пару действительных чисел, за дающих нижнюю и верхнюю границы диапазона изменения некоторого параметра. Интервальная арифметика построена на базовом наборе аксиом, подробно описанном в [17].

Используя такое представление, интервальная арифметика обеспечивает оценивание параметров с минимумом ошибок. При этом ширина конкретного интервала может быть интерпретирована как возможное отклонение числового представления некоторой величины от истинного ее значения. Это вложение реальных или расчетных результатов также распространяется на соответствующие арифметические операции или функции от интервальной переменной, т.е. до тех пор, пока применяются математически корректно определенные операции, специфичные для интервала, результаты вычислений гарантированно дают правильный математический результат. Благодаря этому свойству интервальная арифметика специально разработана для приложений, где точные результаты являются критически важными. Кроме того, недавние достижения доказывают, что интервальные методы более уместны в конкретных приложениях, таких как решение некоторых нелинейных задач, которые, как ранее считалось, невозможно решить с помощью методов вычисления с плавающей запятой. Другими областями, где интервалы доказали свое превосходство, являются глобальная оптимизация и решение задач с обычновенными дифференциальными уравнениями.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ЕЕ МОДЕЛЬ

В данной работе рассматривается гибкая алюминиевая балка с зажатым концом, как показано на рис. 1. Две пьезокерамические накладки приклеены к поверхности на расстоянии 10 мм от неподвижного конца балки. Накладка, приклеенная к нижней поверхности, действует как датчик, а накладка на верхней поверхности – как исполнительный механизм.

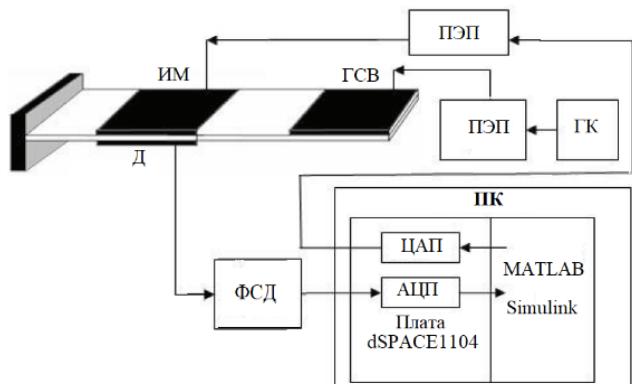


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:
 ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;
 ИМ – исполнительный механизм; ГСВ – генератор сигнала возбуждения; Д – пьезоэлектрический датчик;
 ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь; ГК – генератор колебаний; ПК – персональный компьютер; ЦАП, АЦП – цифро-анalogовый и аналого-цифровой преобразователи;
 ФСД – формирователь сигнала пьезоэлектрического датчика

Для подачи возбуждающего сигнала на конструкцию на верхней поверхности на расстоянии 387,8 мм от неподвижного конца приклеена еще одна пьезокерамическая накладка. Размеры и свойства балки и пьезокерамических накладок приведены в табл. 1.

Выходной сигнал датчика подается на пьезочувствительную систему, которая состоит из усилителя, преобразующего заряд в напряжение. Сформированный сигнал пьезодатчика подается в качестве аналогового входного на плату контроллера DSPACE1104 (*Artisan Technology Group*, США). Алгоритм управления разработан с использованием программного обеспечения среды моделирования Simulink и реализован в режиме реального времени на этом контроллере с использованием инструментов интерфейса DSpace *real time workshop*. Simulink используется для построения блок-схем управления, а DSpace *real time workshop* – для генерации C-кода на основе модели блок-схемы управления. Затем C-код компилируется в объектный код с помощью интерфейса реального времени и компилятора объектного языка, поддерживаемого DSPACE1104. После чего этот код развертывается в аппаратной системе быстрого прототипирования для запуска моделирования оборудования в цикле.

ТАБЛИЦА 1. СВОЙСТВА И РАЗМЕРЫ

Алюминиевая балка		Пьезокерамический датчик/ исполнительный механизм	
Длина (м)	0,5205	Длина (м)	0,0762
Ширина (м)	0,013	Ширина (м)	0,0127
Толщина (м)	0,002	Толщина (м)	0,0005
Модуль Юнга (ГПа)	71	Модуль Юнга (ГПа)	4762×10^9
Плотность (кг/м ³)	2700	Плотность (кг/м ³)	7500
Первая собственная частота (Гц)	7,18	Постоянная пьезоэлектрической деформации (м В ⁻¹)	-247×10^{-12}
		Постоянная пьезоэлектрического напряжения (В м Н ⁻¹)	-9×10^{-3}

Сигнал управления, генерируемый из Simulink, передается на систему пьезоактивации через настраиваемый аналоговый блок ввода/вывода DSPACE 1104. Система пьезоактивации приводит в действие привод, а сигнал возбуждения подается из среды *Simulink* через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) контроллера dSPACE.

Модель рассматриваемой консольной балки получена с использованием рекурсивного метода наименьших квадратов (РМНК), основанного на модели авторегрессии с учетом экзогенных переменных (АРЭП) [23–25]. Сигнал возбуждения, входной и выходной сигналы датчика передаются в среду *MATLAB/Simulink* через аналогоцифровой преобразователь (АЦП) контроллера DSPACE1104. Алгоритм РМНК реализован путем написания *S*-функции в виде *C*-файла, используемой в *MATLAB/Simulink* [26]. Модель пространства состояний, получаемая на основе идентификации параметров модели АРЭП второго порядка, может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{x} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Er}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}^T \mathbf{x}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 92,82 & 103,81 \\ -103,18 & -93,43 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} -0,29 \\ 0,26 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} -0,0056 \\ 0,0055 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{C}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Чтобы учесть неопределенность изменения параметров системы, считалось, что собственная частота может изменяться примерно на $\pm 10\%$. С учетом этих возможных вариаций собственной частоты модели пространства состояний были идентифицированы как системы, где параметры принимают значения на нижней и верхней границах, соответственно. Система с параметрами на нижней границе стала:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}_L \mathbf{x} + \mathbf{B}_L \mathbf{u} + \mathbf{E}_L \mathbf{r}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_L^T \mathbf{x}, \quad (2)$$

где $\mathbf{B}_L = \mathbf{B}$, $\mathbf{E}_L = \mathbf{E}$, $\mathbf{C}_L^T = \mathbf{C}^T$, а $\mathbf{A}_L = \begin{pmatrix} 83,51 & 93,42 \\ -92,85 & -84,13 \end{pmatrix}$.

Система с параметрами на верхней границе приняла вид:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}_U \mathbf{x} + \mathbf{B}_U \mathbf{u} + \mathbf{E}_U \mathbf{r}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_U^T \mathbf{x}, \quad (3)$$

где: $\mathbf{B}_U = \mathbf{B}$, $\mathbf{E}_U = \mathbf{E}$, $\mathbf{C}_U^T = \mathbf{C}^T$, $\mathbf{A}_U = \begin{pmatrix} 103,13 & 115,30 \\ -114,59 & -103,76 \end{pmatrix}$.

Модели (2) и (3) представлены в виде интервальной системы с использованием интервальной арифметики [13–18]. Из этих систем, когда параметры принимают значения на нижнем и верхнем уровнях (границах) можно получить систему для параметров, принимающих интервальные значения:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}_I \mathbf{x} + \mathbf{B}_I \mathbf{u} + \mathbf{E}_I \mathbf{r}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_I^T \mathbf{x}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{A}_I = \begin{pmatrix} [83,51; 103,13] & [93,42; 115,30] \\ [-92,85; -114,59] & [-84,13; -103,76] \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} [-0,29; -0,29] \\ [0,26; 0,26] \end{pmatrix}; \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} [-0,0056; -0,0056] \\ [0,0055; 0,0055] \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{C}^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

IV. ПЕРИОДИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ДИСКРЕТНОМУ ВЫХОДУ

Предположим, что измерения выходного сигнала из системы (1) проводились в дискретные моменты времени $t = mt$, где $m=0, 1, 2, \dots$. Пусть теперь система матриц (Φ_t , Γ_t , \mathbf{C}_t^T) описывает систему, получающуюся из системы (1) для дискретного выходного сигнала, отсчеты которого взяты через интервалы времени τ . Теперь сконструируем выходную матрицу коэффициентов усиления \mathbf{G} , такую, что собственные значения матрицы ($\Phi_t + \mathbf{GC}_t^T$) находились внутри единичного круга. Для системы (Φ_t , Γ_t , \mathbf{C}_t^T) сигнал управления генерируется в соответствии со следующими выражениями:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_n \mathbf{y}(mt), \quad mt + n\Delta \leq t < mt + (n+1)\Delta, \quad \mathbf{K}_{n+N} = \mathbf{K}_n \quad (5)$$

для $n=0, 1, \dots, N-1$, где интервал дискретизации τ делится на N подинтервалов $\Delta = \tau/N$, а N равен или превышает индекс управляемости системы, описываемой матрицами (Φ_t , Γ_t). Отметим, что последовательность матриц усиления $\{\mathbf{K}_0, \mathbf{K}_1, \dots, \mathbf{K}_{N-1}\}$ при подстановке в уравнение (5) генерирует изменяющееся во времени кусочно-постоянное усиление обратной связи по выходу $\mathbf{K}(t)$ для $0 \leq t \leq \tau$. Чтобы увидеть взаимосвязь между последовательностью коэффициентов усиления $\{\mathbf{K}_t\}$ и свойствами замкнутой системы управления, надо представить последовательность матриц \mathbf{K}_n в виде одной общей матрицы:

$$\mathbf{K}^T = (\mathbf{K}_0 \quad \mathbf{K}_1 \quad \dots \quad \mathbf{K}_{N-1}).$$

Используя входной управляющий сигнал $\mathbf{u}(t)$, рассчитанный из уравнения (5), для описания дискретной системы управления в форме пространства состояний, когда отсчеты сигнала проводятся через интервалы времени τ , имеем:

$$\mathbf{x}(m+1) = \Phi^N \mathbf{x}(m) + \Omega \mathbf{K} \mathbf{C}^T \mathbf{x}(m); \quad \mathbf{y}(m) = \mathbf{C}^T \mathbf{x}(m), \quad (6)$$

где $\Omega = [\Phi^{N-1} \Gamma \quad \Phi^{N-2} \Gamma \quad \Phi^{N-1} \Gamma \quad \dots \quad \Gamma]$.

Если система матриц (Φ , Γ) соответствует управляемому объекту, а (Φ_t , \mathbf{C}_t^T) – наблюдаемому, на первом этапе можно так выбрать выходную матрицу коэффициентов усиления возбуждения \mathbf{G} , чтобы собственные значения матрицы ($\Phi_t + \mathbf{GC}_t^T$) находились внутри единичного круга, а затем вычислить последовательность матриц коэффициентов усиления $\{\mathbf{K}_t\}$ такой, что будет выполняться соотношение $\Omega \mathbf{K} = \mathbf{G}$. Проблема с контроллерами, конструируемыми таким способом, заключается в том, что, хотя они являются стабилизирующими, но могут вызывать сильные колебания сигнала между моментами взятия отсчетов. В работах [27–29] таким образом подобран критерий качества, чтобы не было необходимости точного выполнения соотношения $\Omega \mathbf{K} = \mathbf{G}$. Это ограничение заменено штрафной функцией, которая позволяет повысить характеристики устойчивости замкнутой системы управления, допуская незначительные отклонения от исходного решения. Критерий качества выбирается следующим:

$$Q(n) = \sum_{m=0}^{\infty} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_m^T & \mathbf{u}_m^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{u}_m \end{pmatrix} + \sum_{n=1}^{\infty} (\mathbf{x}_{nN} - \mathbf{x}_{nN}^*)^T \mathbf{P} (\mathbf{x}_{nN} - \mathbf{x}_{nN}^*), \quad (7)$$

где матрицы \mathbf{J} , \mathbf{R} и \mathbf{P} – положительно определенные и симметричные весовые матрицы соответствующих размеров. Первый член в (7) представляет собой усредненные энергии объекта в текущем состоянии и управления, а второй член – штраф за отклонение \mathbf{G} от расчетных параметров \mathbf{x}_{nN}^* .

V. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОНТРОЛЛЕРА С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ВЫХОДУ

A. Конструкция контроллера

Контроллер с периодической обратной связью по выходу предназначен для уменьшения амплитуды колебаний консольной балки при резонансе. Для систем матриц $(\Phi_{tL}, \Gamma_{tL}, \mathbf{C}_L^T)$ и $(\Phi_{tU}, \Gamma_{tU}, \mathbf{C}_U^T)$ сформированы стабилизирующие выходные матрицы коэффициентов усиления возбуждения \mathbf{G}_L и \mathbf{G}_U такие, что собственные значения матриц $(\Phi_{tL} + \mathbf{G}_L \mathbf{C}_L^T)$ и $(\Phi_{tU} + \mathbf{G}_U \mathbf{C}_U^T)$ лежат внутри единичного круга.

Интервалы варьирования матриц выходных коэффициентов усиления возбуждения, полученные для системы с параметрами на нижней и верхней границах, равны:

$$\mathbf{G}_L = [-0,8488; 1,5374]; \quad \mathbf{G}_U = [-1,0128; 1,6111].$$

В системе *MATLAB/Simulink* проведено моделирование работы контроллера для различных параметров вибраций и состояний системы управления. На рис. 2 показаны модельные отклики разомкнутой системы и системы с матрицами выходного коэффициента усиления возбуждения для нижней и верхней границ его изменения.

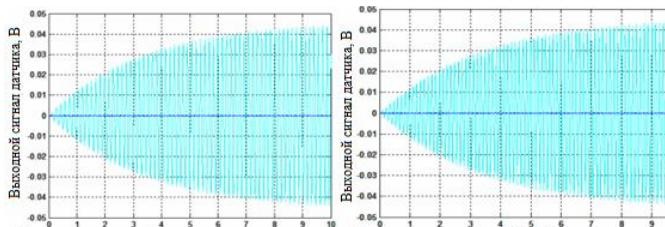


Рис. 2. Отклики на возбуждение вибраций на первой собственной частоте консоли, когда выходная матрица коэффициентов усиления возбуждения выбиралась для нижнего (а) и верхнего (б) интервалов варьирования параметров системы: выход разомкнутой системы (бирюзовый) и выход управляемой системы (синий)

Индекс управляемости системы $(\Phi_t, \Gamma_t, \mathbf{C}^T)$ был равен 2. Пусть тройка $(\Phi, \Gamma, \mathbf{C}^T)$ описывает систему дискретного времени, полученную из системы (A, B, C^T) дискретизацией ее выхода с частотой $1/\Delta$ ($\Delta = \tau/N$, где число подынтервалов $N = 4$). Коэффициент усиления периодической обратной связи на выходе получается путем решения уравнения $\Omega K = G$ при условии, что минимизируется функция качества, задаваемая соотношением (7). Поэтому требуемая амплитуда сигнала управления может быть уменьшена.

Периодическое усиление обратной связи по выходу, полученное по методике, описанной выше, с использованием следующих весовых матриц: $R = 1$; $J = P = 4000 \times I$, где I – единичная матрица размера 4×4 ; $K = (-20,3905; -14,6005; -9,6987; -5,7610)^T$.

Отклики разомкнутой системы и систем с периодическим усилением обратной связи по выходу, а также вид сигнала управления для систем с параметрами, соответствующими нижней границе и для номинальных значений показаны на рис. 3, 4, соответственно. Результаты для системы с параметрами на верхнем уровне практически совпадают с результатами для параметров нижнего уровня.

B. Конструкция контроллера

Контроллер с периодической обратной связью по выходу, описанный выше, применяется для подавления вибрации интеллектуальной конструкции. Отсчеты выходного сигнала пьезоэлектрического датчика проводились через 0,0025 секунды ($\Delta = \tau/N$) с помощью АЦП DSPACE и вводились в среду *MATLAB/Simulink*. Сигнал управления подавался на управляющий привод с интервалом дискретизации 0,01 секунды (τ) через ЦАП контроллера DSPACE. Контроллер реализован на разработанной модели в среде *Simulink*, позволяет в реальном времени проводить исследование снимаемых сигналов. Чтобы продемонстрировать надежность контроллера, длина консоли была сначала увеличена на 10 мм, а потом уменьшена на 5 мм, чтобы получить изменение собственной частоты объекта примерно на $\pm 10\%$. Затем рабочие характеристики разработанного дискретного контроллера одновременного периодического управления по выходу были экспериментально исследованы путем возбуждения структуры сигналом первой собственной частоты консоли с пиковой амплитудой 10 В.

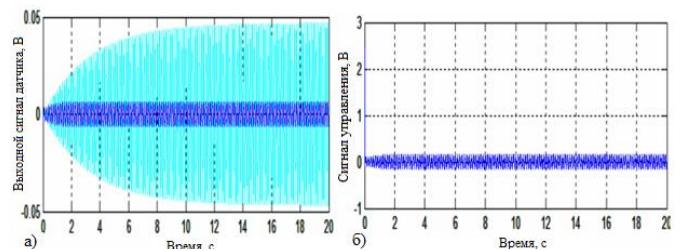


Рис. 3. Отклики на возбуждение на первую собственную частоте консоли для системы с параметрами на нижней границе:
а – неконтролируемый (бирюзовый) и контролируемый (синий) сигналы пьезодатчика; б – сигнал управления

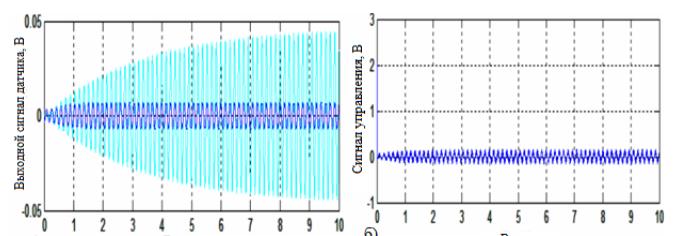


Рис. 4. Отклики на возбуждение на первую собственную частоту консоли для системы с номинальными значениями параметров:
а – неконтролируемый (бирюзовый) и контролируемый (синий) сигналы пьезодатчика; б – сигнал управления

Отклик разомкнутой системы, отклик замкнутой системы с одновременной периодической обратной связью по выходу, и сигнал управления, снимаемые с пульта

управления DSPACE, показаны на рис. 5 и 6, соответственно. Из результатов видно, что снижение амплитуды вибрации составляет приблизительно 70–80 % во всех трех случаях (реальный объект, объект с увеличенной длиной консоли и объект с уменьшенной длиной консоли). Результаты, полученные при увеличении длины консоли, близко совпадают с результатами, полученными при уменьшении ее длины.

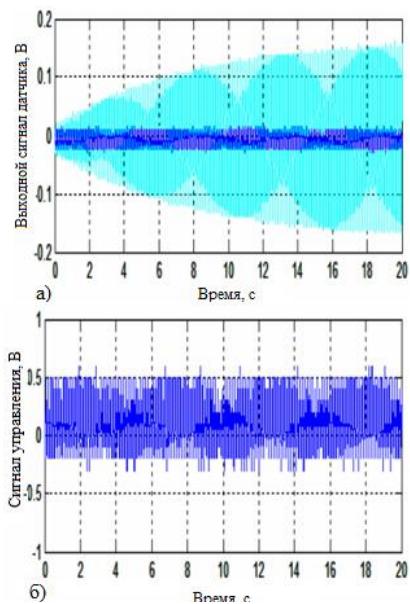


Рис. 5. Данные эксперимента. Реакция на возбуждение на первой собственной частоте для номинальной системы:
а – без использования контроллера управления (бирюзовый)
и с использованием контроллера (синий); б – сигнал управления

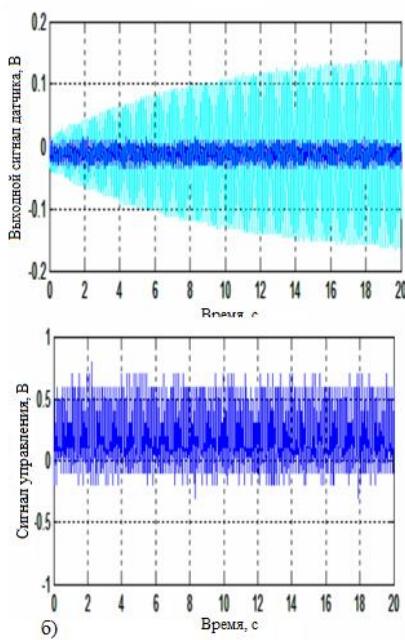


Рис. 6. Реакция на возбуждение на первой собственной частоте с увеличением длины консоли: а – без использования контроллера управления (бирюзовый) и с использованием контроллера (синий); б – сигнал управления

Амплитудные частотные характеристики, полученные с помощью цифрового запоминающего осциллографа (Agilent 54621A) для разомкнутой и замкнутой систем, показаны на рис. 7.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено экспериментальное исследование контроллера с периодической обратной связью по выходу для подавления вибрации интеллектуальной консольной балки. Точная модель структуры балки, снабженной пьезокерамическими накладками, установлена экспериментально с использованием онлайн-подхода к идентификации модели АРЭП с помощью РМНК. Проведена экспериментальная оценка эффективности алгоритмов управления. Показано, что использование контроллера с периодической обратной связью по выходу позволяет снизить амплитуду вибрации для синусоидального сигнала возбуждения на первой собственной частоте приблизительно на 70–80%. Результаты моделирования и экспериментальных исследований показывают, что предложенный контроллер с обратной связью по выходу достаточно прост в реализации, а используемые алгоритмы управления успешно подавляют механические вибрации в консольных балках.

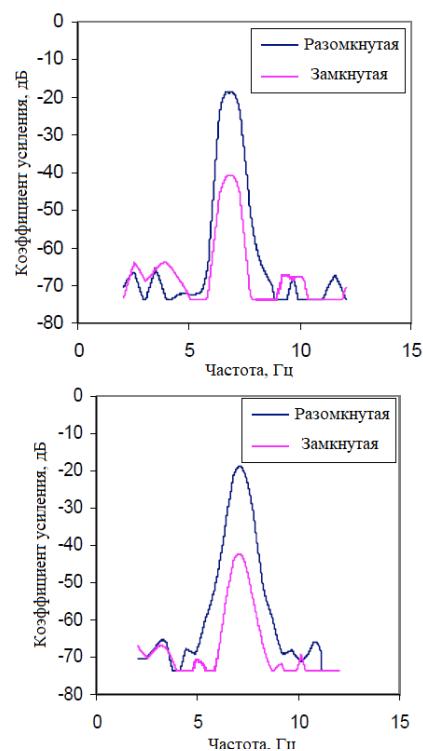


Рис. 7. Амплитудные частотные характеристики:
а – система с номинальными параметрами;
б – система с параметрами на нижнем пределе

ЛИТЕРАТУРА

1. Umapathy M., Bandopadhyay B. Vibration Control of Flexible Beam Through Smart Structure Concept Using Periodic Output Feedback // J. of System Science. – 2000. – Vol. 26, No. 1. – P. 43–66.
2. Ljung L. System Identification: Theory for the User. – Upper Saddle River New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999. – 610 p.
3. Bu X., Ye L., Su Z., Wang C. Active Control of a Flexible Smart Beam Using a System Identification Technique Based on ARMAX // Smart materials and Structures. – 2003. – No. 12. – P. 845–850.
4. Chen S.H., Yang X.-W. Interval Finite Element Method for Beam Structures // Finite Elements in Analysis and Design. – 2000. – No. 34. – P. 75–88.
5. Солопекина А.А., Львов А.А., Семежев Н., Вагарина Н.С. Применение метода неопределенности для анализа погрешностей многополосного рефлектометра // Надежность и качество: Тр. Междунар. симп.: в 2 т. – Пенза: ПГУ, 2017. – Т. 2. – С. 136–139.

6. Solopkina A.A., L'vov A.A., Semezhev N. Calculation of measurement uncertainties of multi-port transmission line reflectometer // Proc. 2014 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. Saratov, Russia: IEEE, 2014. – P. 356-362.
7. Львов А.А., Солопекина А.А., Семежев Н. Расчет неопределенностей измерения характеристик многозондовой измерительной линии // Компьютерные науки и информационные технологии: материалы Междунар. науч. конф. – Саратов: Издат. центр «Наука», 2016. – С. 396-400.
8. Solopkina A.A., Semezhev N., Komarov V.V. et al. Application of the Uncertainty Method for Analysis of Multi-Port Correlator Accuracy // Proc. 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2017. – P. 505-509.
9. Hall B.D. Propagating Uncertainty in Instrumentation Systems // IEEE Trans. on Instrum. and Meas. – 2005. – Vol. 54, No. 6. – P. 2376-2380.
10. Балабан О.М., Балабан В.В., Львов А.А., Светлов М.С. Измерения длины в Древней Греции: неопределенность стандартов в золотой век Олимпийских игр // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018): Сб. трудов VI Междунар. науч. конф. – Саратов: ООО СОП «Лоди», 2019. – С. 611-620.
11. Moore R.E. Methods and Applications of Interval Analysis. – Philadelphia: SIAM, 1979. – 190 p.
12. Moore R.E., Kearfott R.B., Cloud M.J. Introduction to Interval Analysis. – Philadelphia, U.S.A.: SIAM, 2009. – 223 p.
13. Alefeld G., Herzberger J. Introduction to Interval Computations. – New York: Academic Press, 1983. – 352 p.
14. Шаронов П.А., Ивченко С.П., Умнова Е.Г. и др. Интервальный метод расчета неопределенностей в экспериментальных исследованиях тензодатчиков // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2021. – № 3. – URL: mathmod.esrae.ru/26-99 (дата обращения: 27.10.2023).
15. Wang S., Zheng Z., Wang C. Power System Transient Stability Simulation under Uncertainty Based on Interval Method // Proc. of the 2006 Int. Conf. on Power System Technology. – Chongqing, China: IEEE, 2006. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ICPST.2006.321587.
16. Cirillo A., Femia N. Calculation of Internally Controlled Switching Instants in Switched RLC Circuits Using Interval Analysis // IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems Connecting the World. – Atlanta, U.S.A.: IEEE, 1996. – Vol. 1. – P. 593-596.
17. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. – Новосибирск: Изд-во «XYZ». 2019. – 630 с.
18. Tarrazo M. Calculating Uncertainty Intervals in Approximate Equation Systems // Applied Numerical Mathematics. – 1998. – No. 27. – P. 59-67.
19. Matsumoto E., Komagome Y. Intelligent structural elements covered by piezoelectric high-polymer film // Int. J. on Smart Sensing and Intelligent Systems. – 2008. – Vol. 1, No. 2.
20. Chen S.H., Qiu Z.P. A New Method for Computing the Upper and Lower Bounds on Frequencies of Structures with Interval Parameters // Mechanics Research Communications. – 1994. – Vol. 21, Iss. 6. – P. 583-592.
21. Muhanna R.L., Mullen R.L. Uncertainty in Mechanics Problems – Interval Based Approach // ASCE J. of Engineering Mechanics. – 2001. – Vol. 127, No. 6. – P. 557-566.
22. Muhanna R.L., Mullen R.L. Bounds of Structural Response for All Possible Loading Combinations // ASCE J. of Structural Engineering. – 1999. – Vol. 125, No. 1. – P. 98-106.
23. Ezhilarasi D., Umapathy M., Bandyopadhyay B. Design and Experimental Evaluation of Piecewise Output Feedback Control for Structure Vibration Suppression // J. of Smart Materials and Structures. – 2006. – No. 15. – P. 1927-1938.
24. Хансен Э., Уолстер Дж.У. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа. – Ижевск-Москва: Изд-во «РХД», 2010. – 508 с.
25. Мусатов М.В., Львов А.А. Анализ моделей метода наименьших квадратов и методов получения оценок // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – № 4 (43). – С. 137-141.
26. Ingle V.K., Proakis J.G. Digital Signal Processing Using MATLAB Third Edition. – Standford: Cengage Learning, 2012. – 653 p.
27. Werner H. and Furuta K. Simultaneous stabilization based on output measurements // Kybernetika. – 1995. – Vol. 31, No. 4. – P. 395-411.
28. Werner H., Furuta K. Simultaneous stabilization by piecewise constant periodic output feedback // Control Theory and Advanced Technology. – 1995. – Vol. 10, No. 4. – P. 1763- 1775.
29. Werner H. Multi-Model Robust Control by Fast Output Sampling - An LMI approach // Automatica. – 1998. – Vol. 3, No. 12. – P. 1625-1630.

Обобщенный регулятор со встроенными моделями

Григорьев Валерий Владимирович
 Факультет компьютерных
 технологий и управления
 Университет ИТМО
 Санкт-Петербург, Россия
 grigvv@yandex.ru

Мансурова Ольга Карибековна
 Факультет переработки
 минерального сырья
 Санкт-Петербургский горный
 университет
 Санкт-Петербург, Россия
 erke7@mail.ru

Васильев Алексей Евгеньевич
 Факультет переработки
 минерального сырья
 Санкт-Петербургский горный
 университет
 Санкт-Петербург, Россия
 alex20072002@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается процедура построения обобщенного регулятора в непрерывных системах автоматического управления, позволяющего при действии задающего и возмущающего воздействий приложенных к выходу объекта, модели которых задаются линейными автономными дифференциальными уравнениями, обеспечить при их отработке нулевую установившуюся ошибку, а следовательно и высокие точностные показатели. Для этого, в контур управления включаются параллельно встроенные модели по задающему и возмущающему воздействиям с передаточными функциями, причем полиномы знаменателей определяются моделями внешних воздействий, а числители содержат полиномы с настроичными параметрами, выбором которых обеспечиваются требуемые показатели качества переходных процессов. Подобный подход может быть распространен и на дискретные системы управления, только технология построения обобщенных регуляторов должна учитывать специфику описания дискретных процессов в виде разностных уравнений и использовании дискретного преобразования Лапласа.

Abstract. The work examines the procedure for constructing a generalized regulator in continuous automatic control systems, which allows, under the action of the setting and disturbing influences applied to the output of an object, models of which are set by linear autonomous differential equations, to ensure zero steady-state error during their development, and consequently high accuracy indicators. To do this, built-in models for the setting and disturbing effects with transfer functions are included in the control circuit in parallel, and the polynomials of the denominators are determined by models of external influences, and the numerators contain polynomials with tuning parameters, the choice of which ensures the required quality indicators of transients. A similar approach can be extended to discrete control systems, only the technology of constructing generalized controllers should take into account the specifics of describing discrete processes in the form of difference equations and using the discrete Laplace transform.

Ключевые слова: встроенная модель, обобщенный регулятор, точностные свойства, качество переходных процессов.

Keywords: Built-in model, generalized regulator, precision properties, quality of transients.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основными задачами проектирования систем автоматического управления являются создание таких регуляторов, которые обеспечивают требуемое качество переходных процессов и парирование возмущающих воздействий, порождающими влиянием среды функционирова-

ния системы. Основой построения обобщенных регуляторов является включение в контур ошибки встроенных моделей задающего и возмущающего воздействий. На основании анализа работы системы в среде можно выделить наиболее типовые воздействия внешней среды [1–10], приводящие к возникновению наибольших ошибок и получить математические модели внешних воздействий в виде автономных дифференциальных уравнений. Фактически, модель внешних воздействий является их генератором при задании значений начальных условий, определяющих вид и параметры воздействий. Включение подобных моделей в виде встроенных моделей в контур ошибки позволяет парировать внешние воздействия и для линейных моделей обеспечивать в установившемся режиме нулевую ошибку при их отработке.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим систему автоматического управления, структурная схема которой представлена на рис. 1.

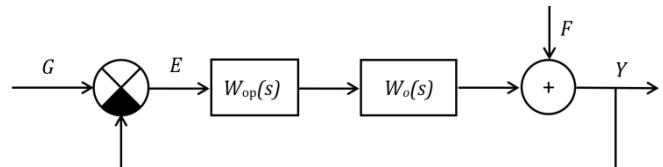


Рис. 1. Структурная схема системы

На рис. 1 использованы следующие обозначения: Y – выходная регулируемая переменная, G – входное воздействие, F – возмущающее воздействие, E – ошибка $E = G - Y$, $W_0(s)$ – передаточная функция объекта управления, $W_{op}(s)$ – передаточная функция обобщенного регулятора. Возмущающее воздействие приложено к выходу системы. Предполагается, что получены модели входного и возмущающего воздействий в виде передаточных функций по входу

$$W_g(s) = \frac{1}{a_qs^q + a_{q-1}s^{q-1} + \dots + a_1s + a_0} = \frac{1}{A(s)} \quad (1)$$

и возмущению

$$W_f(s) = \frac{1}{c_ls^l + c_{l-1}s^{l-1} + \dots + c_1s + c_0} = \frac{1}{C(s)} \quad (2)$$

Вид воздействий определяется значениям q и l полюсов полиномов $A(s)$ и $C(s)$ соответственно, а параметры воздействий задаются значениями начальных условий.

Следует отметить, что рассматриваются модели только сходящихся и незатухающих внешних воздействий, поэтому полюса передаточных функций (1) и (2), порождаемые эти процессы, должны иметь отрицательную вещественную часть либо равную нулю.

Ставится задача построения для объекта управления с передаточной функцией $W_0(s)$ обобщенного регулятора со встроенными моделями определение его структуры и параметров, обеспечивающих в замкнутой системе нулевую ошибку в установившемся режиме при внешних воздействиях, определяемых моделями (1) и (2), и требуемое качество переходных процессов.

III. ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Будем формировать обобщенный регулятор, как параллельное соединение регулятора со встроенной моделью задающего воздействия (1) и регулятора со встроенной моделью возмущающего воздействия (2).

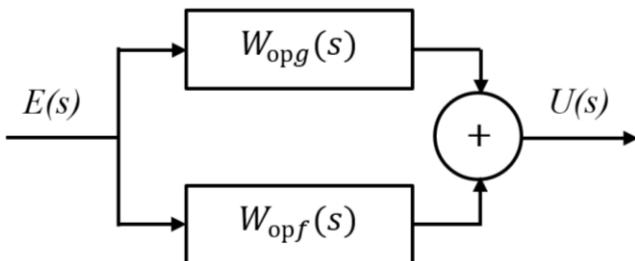


Рис. 2. Структура обобщенного регулятора

На рис. 2 представлена структура обобщенного регулятора. Передаточная функция регулятора со встроенной моделью задающего воздействия задается в виде

$$W_{opg}(s) = \frac{k_q s^q + k_{q-1} s^{q-1} + \dots + k_1 s + k_0}{a_q s^q + a_{q-1} s^{q-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{K_g(s)}{A(s)}. \quad (3)$$

Отметим, что коэффициенты полинома числителя $K_g(s)$ (3) определяют настроочные параметры регулятора и постоянные времени дифференцирующих звеньев.

Порядки полиномов числителя и знаменателя передаточной функции должны совпадать (равны значению q).

Передаточная функция регулятора со встроенной моделью возмущающего воздействия задается следующим образом

$$W_{opf}(s) = \frac{k_{l-1} s^{l-1} + k_{l-2} s^{l-2} + \dots + k_1 s + k_0}{c_l s^l + c_{l-1} s^{l-1} + \dots + c_1 s + c_0} = \frac{K_f(s)}{C(s)}. \quad (4)$$

Коэффициенты полинома числителя $K_f(s)$ (4) определяют настроочные параметры регулятора и постоянные времени дифференцирующих звеньев.

Передаточная функция обобщенного регулятора со встроенными моделями

$$W_{op}(s) = W_{opg}(s) + W_{opf}(s) = \frac{K_g(s) \cdot C(s) + K_f(s) \cdot A(s)}{A(s) \cdot C(s)} = \frac{K_{op}(s)}{A_{op}(s)}. \quad (5)$$

Порядки полиномов числителя и знаменателя передаточной функции должны совпадать и быть равными значению $q + l$. Итак, количество настроенных параметров k_i , $i = 0, 1, \dots, q$ и $j = 0, 1, \dots, l$, всего $q + l$, позволяет обеспечить желаемое качество переходных процессов, а коэффициен-

ты знаменателей передаточных функций $W_{opg}(s)$ и $W_{opf}(s)$ желаемые точностные показатели. Для нахождения значений настроенных коэффициентов можно использовать классические методы модального или оптимального управления, а в простейших случаях настройку регуляторов на модульный или симметричный оптимум [11–14].

IV. ПРИМЕР

Проиллюстрируем приведенные результаты на примере настройки параметров регулятора ленточного конвейера КЛС-800. Передаточная функция $W_0(s)$ имеет вид:

$$W_0(s) = \frac{0,96}{(0,012s+1)(0,9s+1)}. \quad (6)$$

Требуемые показатели качества для системы стабилизации скорости ленты конвейера:

- максимальное значение скорости движения ленты $v^* = 3 \text{ м/с}$;
- значение добротности по скорости $K^* \geq 10 \text{ с}^{-1}$;
- максимально допустимая ошибка отработки заданной скорости конвейера и возмущающих воздействий $e_{\max} = 0,05 \text{ м/с}$;
- желаемое время переходного процесса $t_{\pi}^* = 0,6 \text{ с}$;
- допустимое значение перерегулирования $\sigma^* = 30 \%$;
- возмущающее воздействие гармоническое с максимальными значениями амплитуды $f_0^* = 0,2v^*$ и осредненным значением круговой частоты $\omega_0 = 0,314 \text{ с}^{-1}$.

Предлагается для решения поставленной задачи использовать обобщенный регулятор, содержащий две составляющие [6, 8–10]. Первая составляющая обеспечивает пропорционально-интегральный закон управления по задающему воздействию, а вторая составляющая обеспечивает закон управления со встроенной моделью возмущающего воздействия. В целях получения нулевой установившейся ошибки при отработке возмущающего воздействия данного типа в контур управления вводится вторая составляющая на основе знания модели внешнего воздействия. Передаточная функция регулятора со встроенной моделью для постоянного задающего воздействия имеет вид:

$$W_{\text{ни}}(s) = \frac{k_{\text{и}} \left(\frac{k_{\text{п}}}{k_{\text{и}}} s + 1 \right)}{s}, \quad (7)$$

где $k_{\text{и}}$ коэффициент передачи интегральной составляющей, $k_{\text{п}}$ коэффициент передачи пропорциональной составляющей.

Для данной системы типовым возмущающим воздействием является гармоническое воздействие с максимальным значением амплитуды $f_0^* = 0,2v^*$ и круговой частотой ω_0 ($f(t) = f_0^* \cdot \sin(\omega_0 t)$). Моделью, которая генерирует подобное воздействие, является консервативное звено, описание которого задается передаточной функцией возмущающего воздействия

$$W_{\text{вв}}(s) = \frac{1}{s^2 + \omega_0^2}, \quad (8)$$

а амплитуда сгенерированного сигнала определяется заданием начальных условий. Передаточная функция регулятора со встроенной моделью (8) по возмущающему воздействию имеет вид

$$W_{\text{bm}}(s) = \frac{k_b \left(\frac{k_m}{k_b} p + 1 \right)}{p^2 + \omega_0^2}, \quad (9)$$

где k_b и k_m – настроочные параметры регулятора со встроенной моделью... Обобщенный регулятор формируется как параллельное соединение двух составляющих (7) и (9) регулятора и его передаточная функция равна

$$\begin{aligned} W_{\text{op}}(s) &= \frac{U(s)}{E(s)} = W_{\text{pi}}(s) + W_{\text{bm}}(s) = \\ &= \frac{k_i \left(\frac{k_n}{k_i} s + 1 \right) (s^2 + \omega_0^2) + k_m s^2 + k_b s}{s (s^2 + \omega_0^2)}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $U(s)$ изображение Лапласа управляющего воздействия, $E(s)$ изображение Лапласа ошибки (входного воздействия регулятора).

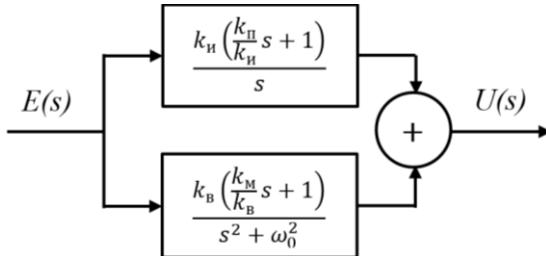


Рис. 3. Структура обобщенного регулятора

На рис. 3 изображена структурная схема обобщенного регулятора. Настроочными параметрами обобщенного регулятора являются коэффициенты k_i , k_n , k_b , k_m . Введение в обобщенный регулятор встроенной модели возмущающего воздействия позволяет получить в установившемся режиме нулевое значение ошибки при отработке возмущающего воздействия. В данном случае с нулевой ошибкой отрабатывается гармоническое воздействие вида $f(t) = f_0^* \cdot \sin(\omega_0 t)$

Перепишем передаточную функцию регулятора (9) в виде:

$$\begin{aligned} W_{\text{op}}(s) &= \frac{k_i \left(\frac{k_n}{k_i} p + 1 \right) (p^2 + \omega_0^2) + k_b \left(\frac{k_m}{k_b} p^2 + p \right)}{p(p^2 + \omega_0^2)} = \\ &= \frac{k_i \omega_0^2 (rp + 1) \left(\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \frac{k_b}{k_i \omega_0^2} p + 1 \right)}{p(p^2 + \omega_0^2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Отметим, что добротность по скорости рассматриваемой системы, как это следует из вида передаточных функций (7) и (8), равна $K^* = k_i \cdot 0,96$, поэтому коэффициент k_i выбирается из требуемого значения добротности по скорости $k_i = \frac{10}{0,96} = \frac{10}{0,96} \approx 11 \text{ c}^{-1}$, а коэффициент $k_n = \tau \cdot k_i = 0,9k_i \approx 10$.

Соотношение коэффициентов k_m и k_b равно $\frac{k_m}{k_b} = \tau = T_{\text{max}} = 0,9 \text{ с}$, откуда следует $k_m = \tau \cdot k_b$. Значение коэффициента k_b влияет на второй сомножитель чисителя передаточной функции регулятора (8), а именно, будет ли этот сомножитель определять передаточную функцию дифференцирующего звена второго порядка, или передаточную функцию двух дифференцирующих звеньев первого порядка. Для того, чтобы данный сомножитель задавал описание двух дифференцирующих

звеньев первого порядка значение $\frac{k_b}{k_i \cdot \omega_0} \geq 2$ или $k_b \geq 2k_i \cdot \omega_0 = 6,9$. При выборе значения $k_b = 80$ значение $k_m = 72$. Таким образом, настроочные параметры регулятора коэффициенты равны $k_i = 11$, $k_n = 10$, $k_b = 80$, $k_m = 72$.

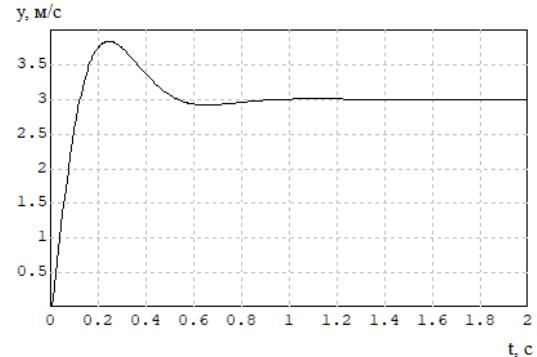


Рис. 4. Реакция системы на отработку заданной скорости транспортировки

На рис. 4 приведен график переходной функции из которого следует, что заданная скорость движения ленты конвейера 3 м/с при использовании обобщенного регулятора (10) с выбранными параметрами отрабатывает задающее воздействие с временем переходного процесса $t_n = 0,5 \text{ с}$ и перерегулированием $\sigma = 27 \%$, без статической ошибки. Увеличение выбранного значения параметра k_b при сохранении соотношения с параметром k_m приводит к увеличению значения перерегулирования и времени переходного процесса, а следовательно к не выполнению требуемых показателей качества. Уменьшение значения параметра k_b хотя и уменьшает значение перерегулирования, но ухудшает время переходного процесса.

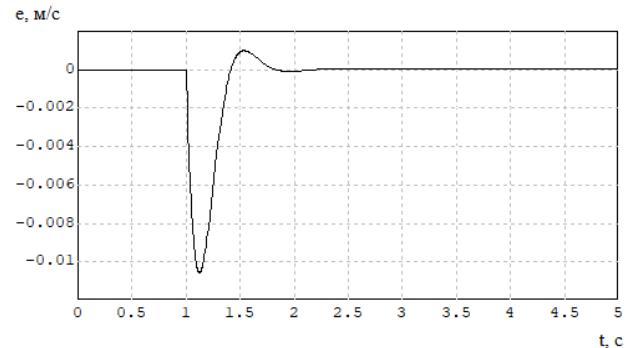


Рис. 5. График изменения ошибки $e(t)$ системы с обобщенным регулятором при гармоническом возмущающем воздействии $f(t) = 0,6 \cdot \sin(0,314t)$

На рис. 5 изображен график ошибки при отработке гармонического сигнала номинальной частоты, поданный с запаздыванием 1 с. Использование встроенной модели возмущающего незатухающего гармонического воздействия с частотой $\omega_0 = 0,314 \text{ c}^{-1}$ в обобщенном регуляторе позволяет получить в установившемся режиме в замкнутой системе нулевую ошибку при отработке гармонического воздействия той же самой частоты.

Рассмотрим, как изменяется ошибка в установившемся режиме при отработке гармонических возмущающих воздействий с частотами, отличающимися от номинальной частоты настройки встроенной модели $\omega_0 = 0,314 \text{ c}^{-1}$.

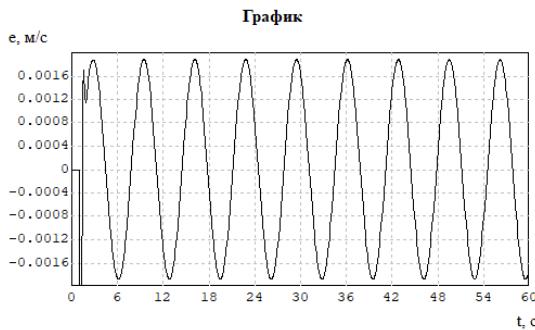


Рис. 6. График изменения ошибки $e(t)$ системы с обобщенным регулятором при гармоническом возмущающем воздействии $f(t) = 0,6 \cdot \sin(0,942t)$

На рис. 6 изображен график изменения ошибки при возмущающем воздействии, с частотой, отличающейся от номинальной. Увеличение значения частоты гармонического возмущения в три раза $f(t) = 0,6 \cdot \sin(0,942t)$ приводит к значению амплитуды установившейся ошибки $e_y = 0,0019$, то есть подавление возмущающего воздействия происходит в $0,6/0,0019 = 315$ раз. Уменьшение значения частоты гармонического возмущения в три раза $f(t) = 0,6 \cdot \sin(0,105t)$ приводит к значению амплитуды установившейся ошибки $e_y = 0,0008 \text{ с}^{-1}$ и подавление в 750 раз. С ПИ регулятором значение амплитуды установившейся ошибки $e_y = 0,0055 \text{ м/с}$, подавление возмущающего воздействия происходит в 109 раз. Таким образом можно сделать вывод, что в диапазоне частот $[0,105, 0,942]$ амплитуда установившегося значения ошибки при отработке возмущающих воздействий $f(t) = f_0^* \cdot \sin(\omega t)$ не превосходит значения $e_y^* = 0,002 \text{ м/с}$, а подавление возмущения происходит не хуже, чем в 500 раз.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика построения структуры и определения настроек параметров обобщенного регулятора с использованием метода встроенных моделей за дающего воздействия и возмущающего воздействия, приложенного к выходу объекта управления. Введение в систему управления конвейером алгоритма достижения требуемых показателей по качеству и точности процесса стабилизации скорости конвейера обеспечивает поддержание скорости на необходимом уровне при возмущающих воздействиях, таких как перегрузка, недогрузка, растяжение ленты, неоднородность размеров и массы. Результаты статьи могут найти применение для настройки параметров автоматических регуляторов систем управления транспортировкой руды дробильного агрегата, шаровой мельницы с целью повышения производительности на горно-обогатительных комбинатах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kondrasheva N.K., Kireeva E.V., Zyrjanova O.V. Development of new compositions for dust control in the mining and mineral transportation industry // J. Min. Inst. – 2021. – Т. 248, № 2. – С. 272-280.
2. Плащинский В.А., Белоглазов И.И., Ахмеров Э.В. Анализ модели изнашивания рабочих элементов шаровой мельницы в процессе измельчения руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. – С. 91–110. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_91.
3. Romashev A.O., Nikolaeva N.V., Gatiatullin B.L. Adaptive Approach Formation Using Machine Vision Technology to Determine the Parameters of Enrichment Products Deposition // J. Min. Inst. – 2022. – 256. – Р. 677-685.
4. Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Зигангиров Р.Р., Мицхахов А.А., Суворов Ю.И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного института. – 2024.
5. Николаева Н.В., Каллаев И.Т. Особенности процесса измельчения медно-молибденовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 52-66. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_52.
6. Федорова Э.Р., Трифонова М.Е. Анализ измеряемых параметров секции измельчения руд горнообогатительного комбината, Промышленные АСУ и контроллеры. – М.: Издво "Научтехлитиздат", 2019. – № 2. – С. 3-10.
7. Beloglazov I. Review of Advanced Digital Technologies // Modeling and Control Applied in Various Processes. Symmetry. – 2024. – 16, 536. – <https://doi.org/10.3390/sym16050536>.
8. Beloglazov I., Plaschinsky V. Development MPC for the Grinding Process in SAG Mills Using DEM Investigations on Liner Wear // Materials. – 2024. – 17, 795. – <https://doi.org/10.3390/mat17040795>.
9. Вальнев В.В., Котелева Н.И., Суворов Д.Н. Новый подход к автоматизации технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2024. – Т. 20, № 1 (35). – С. 34-48.
10. Васильева Н.В., Федорова Э.Р. Statistical methods of evaluating quality of technological process control of trends of main parameters dependence // Journal of Physics: Conference Series, UK. – Vol. 1118, Issue 1, 10 December 2018, №012046.
11. Мансурова О.К., Лебедик Е.А., Васильев А.Е. Система автоматического регулирования скорости ленточного конвейера подачи руды для металлургического производства // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 2 (138). – URL: <https://research-journal.org/archive/12-138-2023-december/10.23670/IRJ.2023.138.143> (дата обращения: 27.06.2024). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.143.
12. Мансурова О.К., Григорьев В.В., Быстров С.В., Першин И.М. Адаптивная настройка распределенных регуляторов // Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 9. – С. 814-824.
13. Мансурова О.К., Григорьев В.В., Быстров С.В., Першин И.М., Бушаев А.Б. Оценка областей экспоненциальной устойчивости нелинейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 3. – Т. 21. – С. 131-135.
14. Юнэм У.М. Линейные многомерные системы управления: Геометр. подход: пер. с англ. Э.Л. Наппельбаума. – М.: Наука, 1980. – 375 с.: ил.; 22 см. – ISBN В пер. (В пер.): 3 р. 80 к.

Контроль и повышение достоверности результатов хроматографического анализа

Куркина Виктория Вадимовна

Факультет информационных
технологий и управления
Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
victoria.kurkina@gmail.com

Ковалёв Дмитрий Александрович

Высшая школа технологии и
энергетики
Санкт-Петербургский
государственный университет
промышленных технологий
и дизайна
Санкт-Петербург, Россия
d.a.kovalyov@yandex.ru

Русинов Леон Абрамович

Факультет информационных
технологий и управления
Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
lrusinov@yandex.ru

Колпацникова Анастасия Петровна

Факультет информационных
технологий и управления
Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)
Санкт-Петербург, Россия
lrusinov@yandex.ru

Аннотация. Задача повышения достоверности измерительной информации является важной и актуальной в том числе для хроматографического анализа. Последний играет большую роль при определении качественных характеристик продуктов и полупродуктов потенциально-опасных технологических процессов химических производств, например, в первичной переработке нефти. Анализ экспертной информации позволил определить возможные отказы (нарушения) в хроматографической системе и их проявления в искажении формы хроматографического пика и базисной линии, которые представляют собой диагностические показатели. На базе данной информации была разработана диагностическая модель в виде графа причинно-следственной связи. Для всех диагностических показателей определены критерии для их идентификации. Итогом проведенного исследования представлен разработанный алгоритм контроля и повышения достоверности хроматографического сигнала. Программирование данного алгоритма позволяет использовать его в аналитических лабораториях для анализа достоверности хроматографического сигнала.

Abstract. The task of increasing the reliability of measurement information is important and relevant also for chromatographic analysis. The latter plays a major role in determining the qualitative characteristics of products and intermediates of potentially hazardous technological processes of chemical industries, for example, in primary oil refining. The analysis of expert information allowed to determine possible failures (violations) in the chromatographic system and their manifestations in the distortion of the shape of the chromatographic peak and baseline, which are diagnostic indicators. Based on this information, a diagnostic model was developed in the form of a cause-and-effect graph. Criteria for their identification were defined for all diagnostic indicators. The result of the conducted research is presented the developed

algorithm of control and increase of reliability of chromatographic signal. Programming of this algorithm will allow to use it in analytical laboratories to analyze the reliability of the chromatographic signal.

Ключевые слова: достоверность, информация, качество, контроль, хроматография, анализ, отказы, нарушения, диагностический показатель, диагностическая модель, критерий, статистика, алгоритм.

Keywords: validity, information, quality, control, chromatography, analysis, failures, violations, diagnostic index, diagnostic model, criterion, statistics, algorithm.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире информация играет ключевую роль в различных сферах деятельности: от науки и технологий до бизнеса и повседневной жизни. Однако, важность информации заключается не только в ее наличии, но и в ее достоверности. Понятие достоверности информации является одним из основных понятий в различных областях деятельности, таких как метрология, наука, технологии, бизнес и другие.

Достоверность информации определяется как свойство информации, которое подтверждает, что информация является правильной и полной в соответствии с ожиданиями пользователя, который использует эту информацию. Достоверность информации связана с ее целостностью, конфиденциальностью и доступностью. Достоверность информации требует, чтобы она была защищена от несанкционированного доступа, изменения, уничтожения, а также от ошибок и неправильных действий [1].

Основные свойства и характеристики достоверности информации:

1) Источник информации. Достоверность информации зависит от того, откуда она была получена. Например, информация, полученная от эксперта в данной области, будет более достоверной, чем информация, полученная от непроверенного источника. Точность информации.

2) Точность информации – это соответствие информации действительности. Если информация точна, то она может быть считаться достоверной.

3) Полнота информации. Достоверность информации также зависит от ее полноты. Если информация неполная или неполноценная, то она может быть недостоверной.

4) Актуальность информации. Достоверность информации также зависит от ее актуальности. Если информация устарела, то она может быть недостоверной.

5) Надежность информационных систем. Достоверность информации зависит от надежности информационных систем, которые используются для ее обработки и хранения.

6) Целостность информации. Целостность информации – это сохранение ее первоначального состояния и отсутствие внешних воздействий на нее.

Важность понятия достоверности информации заключается в том, что надежность информации является необходимой для принятия правильных решений. Недостоверная информация может привести к неправильным выводам и действиям, что может привести к серьезным последствиям. Важно учитывать понятие достоверности информации при ее получении, обработке, хранении и передаче [2–3].

Разногласия и споры на тему понятия достоверности информации наиболее актуальны в сфере метрологии и инженерии, где точность и достоверность измерений являются ключевыми факторами в проектировании и эксплуатации различных систем.

В области метрологии понятие достоверности связано с возможностью измерения воспроизводиться в пределах заданной точности. Многие метрологи относятся к этому понятию как к мере близости результатов измерения к истинному значению величины, которую не всегда можно определить.

Однако, в инженерном сообществе, особенно в области информационных технологий, понятие достоверности связано с гарантией того, что полученная информация не была изменена или подделана, и что она действительно является точным отображением реального состояния объекта.

Также существует множество мнений ученых на тему понятия достоверности информации. Некоторые ученые считают, что достоверность информации является одним из главных критериев качества информации и она должна быть гарантирована во всех случаях. Другие же ученые полагают, что достоверность информации зависит от контекста и может быть оценена только в конкретном контексте [4–6].

Например, Ханс-Йохен Шпехт, профессор технической кибернетики в Университете Техники в Дармштадте (Германия), считает, что достоверность информации должна быть гарантирована в технических системах,

таких как автоматизированные системы управления, автоматические регулировочные системы и т.д. Он утверждает, что в таких системах даже небольшое искажение данных может привести к серьезным последствиям.

Также профессор Л.В. Кравченко считает, что понятие достоверности информации необходимо рассматривать в контексте того, что она используется для. Если информация используется для принятия решений, то ее достоверность должна быть более высокой, чем если она используется только для ознакомления.

Другие ученые, например, Йенс Клуккинг, профессор философии в Университете Фрибурга (Германия), утверждают, что достоверность информации зависит от контекста, и ее нельзя оценивать вне контекста. Они считают, что значение информации может изменяться в зависимости от целей, которые стоят перед тем, кто использует эту информацию.

Есть ученые, которые полагают, что достоверность информации зависит от источника, который ее предоставляет. Например, Райан Харрисон, профессор информатики в Университете Бирмингема (Великобритания), считает, что достоверность информации должна быть оцениваема по надежности источника, который ее предоставляет [7–9].

Из всего сказанного можно отметить, что понятие достоверности информации является важным и необходимым в различных областях науки и техники. Несмотря на то, что в каждой области могут существовать разные трактовки этого понятия и возникать споры и разногласия, все же важно придерживаться общих принципов и подходов к оценке достоверности информации.

Влияние достоверности информации на принятие решений и результаты работы в различных областях не может быть переоценено. Недостоверная информация может привести к серьезным ошибкам, как в научных исследованиях, так и в промышленной или коммерческой деятельности. Поэтому важно обеспечить надежность и достоверность информации на всех этапах ее производства, обработки и передачи [10].

В целом, понятие достоверности информации является неотъемлемой частью современной науки и техники и необходимо уделять ему должное внимание при разработке и реализации любых проектов.

В технических средствах, таких как приборы, устройства и технические системы, предназначенные для автоматизации производств, важность достоверности еще более очевидна. Недостоверные данные или ошибки в измерениях могут привести к неправильным выводам, повреждению оборудования, потере продукции или даже угрозе безопасности. Поэтому строгий контроль качества, повышение точности измерений и обеспечение достоверности информации в технических средствах становятся неотъемлемой частью процессов проектирования, производства и эксплуатации технических систем. В контексте методов анализа, особенно таких как хроматография в потенциально опасных процессах химической и нефтехимической технологии, достоверность играет важную роль в получении информации о составе и свойствах материалов, продуктов и процессов, что имеет прямое влияние на качество и безопасность технических средств и самих процессов.

Хроматографический анализ играет важную роль в различных областях науки и промышленности. Он позволяет проводить качественное и количественное определение различных веществ в образцах, что необходимо для обеспечения качества продукции, контроля за процессами производства и научных исследований.

Однако, одним из основных недостатков хроматографического анализа является возможность получения неточных результатов из-за различных факторов, таких как неоднородность образца, несоблюдение условий анализа или неправильная калибровка оборудования. Для обеспечения достоверности результатов хроматографического анализа необходимы методы контроля и повышения точности и надежности получаемых данных, которые рассматриваются в данной статье.

II. ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА

Хроматография (греч. chromatos – цвет и grapho – пишу) как метод анализа окрашенных компонентов экстрактов листьев растений была открыта и исследована в период с 1903 по 1906 г. русским ботаником Михаилом Цветом. Он же предложил использовать термин «хроматография» для открытого метода анализа [11].

Интенсивное развитие хроматографического метода анализа происходило во второй половине прошлого века. В настоящее время хроматография является одним из наиболее универсальных и широко используемых методов качественного и количественного анализа сложных жидких и газообразных сред. По имеющимся оценкам, порядка 60 % всех анализов, выполняемых в мире, основываются на использовании хроматографии.

На рис. 1 и 2 представлены в общем виде структурная схема хроматографа и классическая хроматограмма.

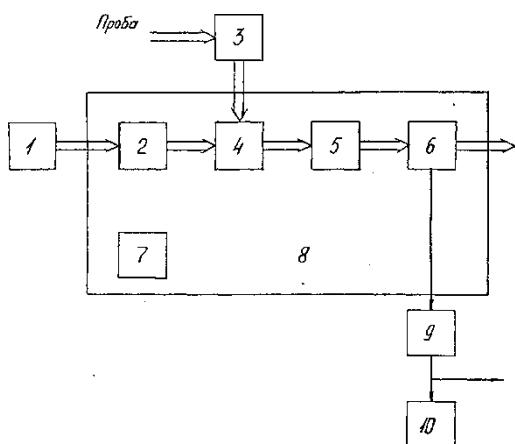


Рис. 1. Структурная схема хроматографа : 1 – источник, 2 – блок подготовки, 3 – дозатор, 4 – испаритель, 5 – колонка, 6 – детектор, 7 – хроматограф, 8 – термостат, 9 – усилитель, 10 – самописец

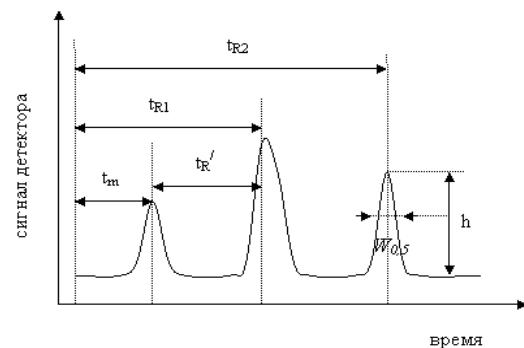


Рис. 2. Классическая хроматограмма

Аналитическую хроматографию можно определить как метод качественного и количественного анализа многокомпонентных сред, основанный на разделении исследуемой среды на отдельные компоненты в процессе движения подвижной фазы, содержащей исследуемую среду, относительно неподвижной фазы за счет различного взаимодействия компонентов исследуемой среды с неподвижной фазой, их многократного распределения между названными фазами, и измерении количества разделенных компонентов с помощью анализаторов физико-химических свойств газов или жидкостей. Причем именно благодаря тому, что в аналитической хроматографии используется определение количеств отдельных компонентов вне зависимости от их числа в исследуемой сложной среде, этот метод анализа обеспечивает получение точной измерительной информации о концентрациях компонентов.

III. АНАЛИЗ ЭКСПЕРТНОЙ ИНФОРМАЦИИ.

Практически в каждом блоке структурной схемы хроматографа могут возникать те или иные отказы. В данной работе будем рассматривать возможные отказы только хроматографической системы.

Экспертами [12] были выявлены основные нарушения в выходном сигнале хроматографа, представленные на рис. 3–10.

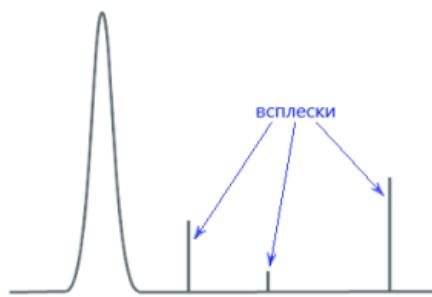


Рис. 3. Всплески (выбросы) на хроматограмме

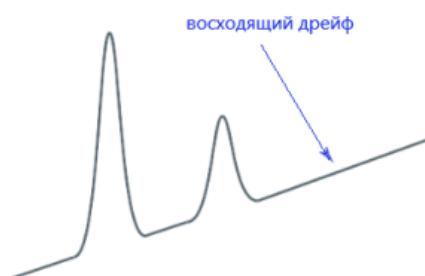


Рис. 4. Монотонный восходящий дрейф на хроматограмме

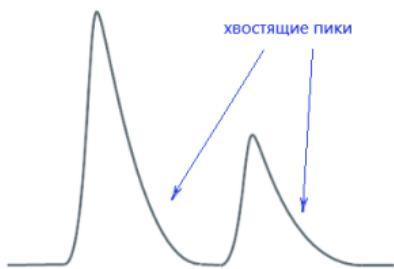


Рис. 5. «Хвостящие» пики (правосторонняя асимметрия) на хроматограмме

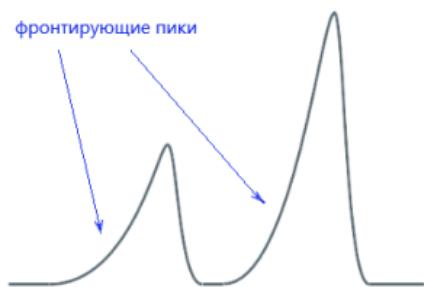


Рис. 6. «Фронтирующие» пики (левосторонняя асимметрия) на хроматограмме



Рис. 7. Скачки (сдвиги) базисной линии

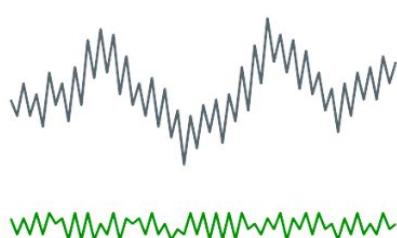


Рис. 8. Повышенный уровень шума

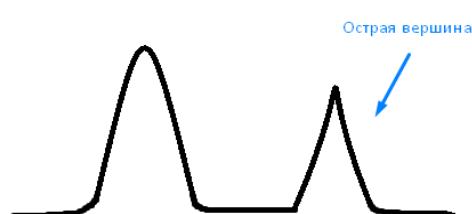


Рис. 9. Неправильная форма вершины – островершинность



Рис. 10. Неправильная форма вершины – плосковершинность

Данные нарушения представляют собой диагностические показатели, причинами которых являются те или иные отказы в хроматографической системе. Экспертами было определено множество отказов в хроматографической системе, приводящих к тем или иным нарушениям формы пиков и базисной линии хроматограммы. На основе этой информации может быть построена диагностическая модель в виде графа причинно-следственной связи.

IV. КОНТРОЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Достоверность, как свойство информации, имеет множество определений. Интерес для организации контроля достоверности представляет следующее определение, в котором достоверность практически определяется численно:

Достоверность – это вероятность отсутствия в измерительной информации аномальных ошибок различного рода.

$$D = 1 - P_{\text{ош}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ош}}$ – вероятность аномальной ошибки.

Здесь к аномальным ошибкам относятся систематические (дрейф, сдвиги) и случайные – выбросы, повышенный уровень шума. Практически, эти аномальные ошибки и есть наши диагностические показатели, искающие форму хроматографического сигнала.

Контроль достоверности осуществляется статистиками, которые позволяют идентифицировать с заданным уровнем значимости наличие всех перечисленных выше диагностических показателей. Своевременная идентификация этих показателей позволяет определить по диагностической причинно-следственной модели отказ или множество отказов и рекомендации к устранению причин их возникновения. Статистик с различными характеристиками достаточно много. Предлагаемые нами статистики контроля достоверности хроматографической информации представлены в табл. 1 [13].

ТАБЛИЦА 1. СТАТИСТИКИ КОНТРОЛЯ ДОСТОВЕРНОСТИ

Диагностический показатель	Обозначение	Статистика	Предлагаемый уровень значимости
Всплески (выбросы)	A	Критерий Диксона Критерий Смирнова-Граббса	0,05
Монотонный восходящий дрейф	B	Критерий Аббе	0,05
«Хвостящие» пики (правосторонняя асимметрия)	C	Коэффициент асимметрии	0,05
«Фронтирующие» пики (левосторонняя асимметрия)	D	Коэффициент асимметрии	0,05
Повышенный уровень шума на базисной линии	E	Сравнение с допуском на СКО	0,05
Скачки (сдвиги) базисной линии	F	Статистика для расчета сдвинутых значений	0,05
Неправильная форма вершины (плоская/острая вершина)	G	Четвертый центральный момент	0,05

Из приведенных в таблице статистик рассмотрим критерии определения искажения формы пика:

a) Алгоритм обнаружения плоско- и островершинности

Четвертый центральный момент рассчитывается по формуле

$$E = \frac{\mu_4}{\sigma_4} - 3 \quad (2)$$

$$\mu_4 = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4) \quad (3)$$

$$\sigma_4 = \mu_2^2. \quad (4)$$

Решающие правила алгоритма:

- если $E > \Delta$ – обнаружено отклонение;
- если $E < 0$ – плоская вершина пика;
- если $E > 0$ – остшая вершина пика [14].

b) Алгоритм обнаружения асимметрии

Искажение формы пика «асимметрия» определяется коэффициентом асимметрии А. Коэффициент асимметрии вычисляется по формуле:

$$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \quad (5)$$

$$\mu_3 = \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3), \quad (6)$$

где μ_3 – третий центральный момент,

$$\sigma_3 = \left(\sqrt{\mu_2} \right)^3 \quad (7)$$

σ – среднеквадратичное отклонение.

Решающие правила алгоритма:

- если $|A| > \Delta$ – асимметрия обнаружена;
- если $A < 0$ – левосторонняя асимметрия;
- если $A > 0$ – правосторонняя асимметрия [14].

Следующий шаг для контроля и повышения достоверности -разработка комплексного алгоритма, который включает проверку наличия диагностических показателей по перечисленным выше статистикам и подалгоритм идентификации отказов, приведшим к найденным нарушениям хроматографического сигнала. Своевременное обнаружение недостоверных результатов способствует ликвидации отказа, приведшему к такому результату и существенно повышает достоверность хроматографической информации.

Комплексный алгоритм контроля и повышения достоверности разрабатывается на основе математических описаний статистик идентификации диагностических показателей хроматографического сигнала, приведенных в табл. 1 и общем виде представлен на рис. 11 [15]:

Рассмотрим методику разработки алгоритма контроля достоверности на конкретном примере.

Один из вариантов основного хроматографического пика с рядом возможных нарушений представлен в табл. 2.

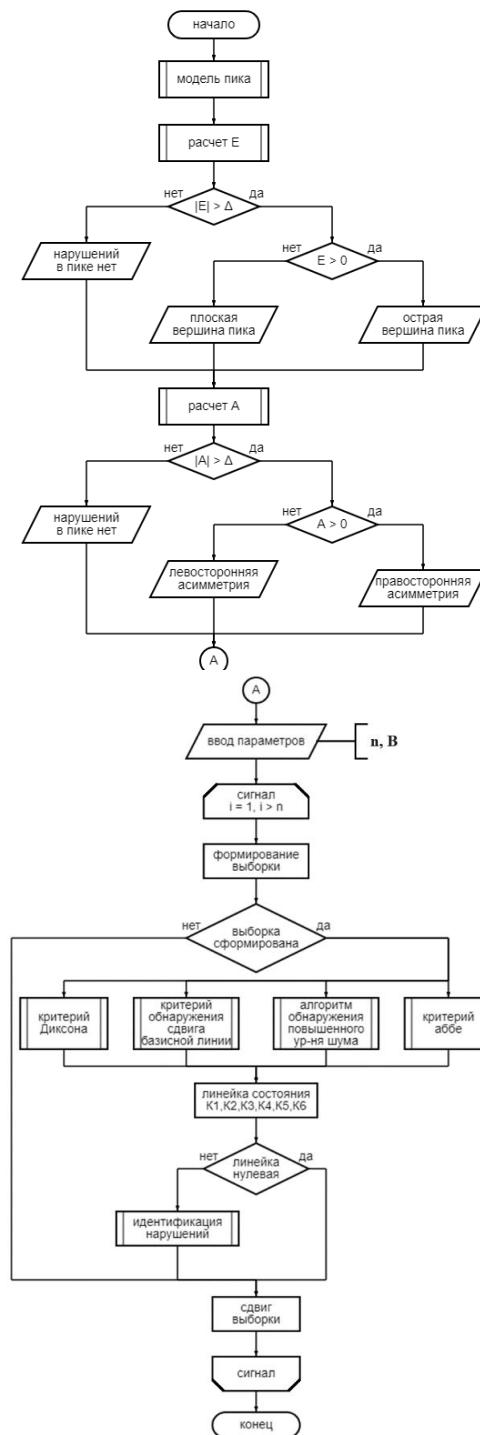


Рис. 11. Блок-схема разработки комплексного алгоритма повышения достоверности

ТАБЛИЦА 2. ПРИМЕР ПИКА С НАРУШЕНИЯМИ

Вид выходного сигнала хроматографа (один основной пик)	Диагностические показатели	Код
	1. Выбросы 2. Монотонный дрейф 3. Островершинность пика 4. Повышенный уровень шума	A B G E

Используя экспертную информацию описания отказов, приводящих к перечисленным диагностическим показателям хроматографического сигнала, представленных в табл. 3, может быть построен фрагмент диагностической модели в виде графа причинно-следственной связи – рис. 12.

ТАБЛИЦА 3. Отказы (неисправности)

Код неисправности	Вид неисправности
1-1	Накопление пыли в трубопроводах, постепенно приводящее к образованию положительных всплесков (выбросов)
1-2	Плохой контакт разъёма усилителя с электродом ПИД, ТИД, ЭЗД
2-1	Грязный детектор
2-2	Грязь в колонке
2-3	Новая колонка не кондиционирована
2-4	Грязь с септы/лайнера испарителя
2-5	Плохое качество газа-носителя
4-1	Неправильно установлена колонка
5-1	Нестабилизированный детектор
5-2	Деструкция пробы
5-3	Неисправный регулятор давления в компрессоре
5-4	Сильная утечка через септу сразу после вкюча
5-5	Некорректно заданы газы в детекторе
5-6	Утечка при использовании МСД, ДТП или ЭЗД
6-1	Неудерживаемый компонент
6-2	Зашкал детектора
6-3	Перегруз детектора

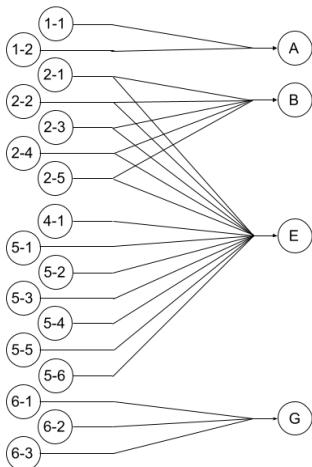


Рис. 12. Фрагмент диагностической модели

Первая цифра кода отказов соответствует месту возникновения отказа в хроматографической системе, представленных в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Места возникновения отказов и их коды

Код отказа	Место возникновения отказа
1	Блок подготовки пробы
2	Блок отбора и ввода пробы
4	Блок детектирования
5	Блок регистрации
6	Блок обработки

Далее по примеру, представленному на рис. 11 разрабатывается комплексный алгоритм контроля и повышения достоверности с включением статистики Диксона для идентификации выбросов на базисной линии, статистики Аббе для идентификации монотонного дрейфа базисной линии, проверки повышенного уровня шума на базисной линии и расчет четвертого центрального момента для идентификации плосковершинности пика.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено понятие достоверности информации, проанализирована проблема повышения достоверности измерительных систем, в частности результатов хроматографического анализа.

Для важнейших методов анализа, используемых в потенциально-опасных технологических процессах химической и нефтехимической промышленности, таких как хроматография, достоверность играет важную роль в получении информации о составе и свойствах материалов, продуктов и процессов, так как результаты анализа непосредственно влияют на качество и безопасность технологического процесса.

Следует оценить экспертную информацию о отказах (нарушениях) в различных блоках хроматографа и их проявлениях в хроматографическом анализе, которая была использована для разработки диагностической модели и комплексного алгоритма контроля достоверности с целью ее повышения.

В результате данной разработки сделан вывод, что контроль и повышение достоверности измерительной информации выходного сигнала хроматографа является важным аспектом в области аналитической химии. Применение соответствующих методов и техник позволяет устранить или уменьшить влияние искажающих факторов и получить точные и достоверные результаты анализа.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 "Точность (правильность и точность) методов и результатов измерений. Часть 6. Руководство по определению повторяемости и воспроизводимости результата измерения стандартным методом".
- Ланге А. Методы и средства обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2006.
- Березовский В.И. Качество информации. – М.: МИФИ, 2005.
- Наумов А.В. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 360 с.
- Андреев В.П., Бабкин А.В., Калашников И.А., Михайлов А.Ю. Оценка погрешности измерений. Руководство по вычислительной технике и программированию. – М.: Изд-во "Машиностроение", 2006.
- Панфилов Д.Ю., Резников Н.А. Основы метрологии. – М.: Изд-во "Высшая школа", 2007. 3 М.Ю. Левин, Е.И. Столярова. Метрология и измерения в информационно-измерительных системах. – СПб.: Изд-во "Питер", 2005.
- Шестопалов И.П. Достоверность и измерения. – М.: Машиностроение, 1981.
- Розенталь Д.А. Понятие ошибки и точности при измерении // Приборы и техника эксперимента. – 1963. – № 3. – С. 7-14.
- Морозова И.А. К вопросу о понятии достоверности результатов испытаний // Электроника: научно-технический журнал. – 2017. – № 11. – С. 46-51.
- ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 «Точность (правильность и точность) методов и результатов измерений. Часть 6. Руководство по определению повторяемости и воспроизводимости результата измерения стандартным методом».
- Хроматографические анализаторы, Общие сведения о хроматографических методах анализа. – URL: https://studme.org/423994/tehnika/hromatograficheskie_analizatory (дата обращения: 06.07.2024).
- Основные параметры хроматографических пиков – Хроматограф.ру. – URL: <https://chromatograf.ru/2023/09/19/osnovnye-parametry-hromatograficheskikh-pikov/> (дата обращения 06.07.2024).
- Буховец А.Г., Москалев П.В. Алгоритмы вычислительной статистики в системе R: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Лань, 2021. – 160 с. – ISBN 978-5-8114-1802-2. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/168872> (дата обращения: 01.07.2024). – Режим доступа: по подписке.
- ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонений распределения вероятностей от нормального распределения. Национальный стандарт Российской Федерации: Дата введения 2002-07-01.
- ГОСТ 19-701-90, ИСО 5807-85 ЕСПД. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем.

Проектирование алгоритмов управления распределением энергии в Smart Grid с использованием синергетического подхода

Скляров Сергей Анатольевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

sasklyarov@sfedu.ru

Веселов Геннадий Евгеньевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

gev@sfedu.ru

Аннотация. В статье рассмотрен способ синхронизации в GRID системе. Синтезирован регулятор стабилизации тока повышающего преобразователя синергетическим методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Проведено сравнение полученного результата с основными методами регулирования и показана эффективность его работы. Натурные исследования синтезированной системы управления подтвердили теоретические результаты о стабильности и асимптотической устойчивости.

Annotation. The article considers the method of synchronization in the GRID system. The regulator of the current stabilization of the step-up converter is synthesized by the synergetic method of analytical design of aggregated regulators. The obtained result is compared with the main control methods and the efficiency of its operation is shown. Natural studies of the synthesized control system confirmed the theoretical results on stability and asymptotic sustainability.

Ключевые слова: передача энергии, синхронизация, повышающий стабилизатор тока, GRID сеть, синергетическое управление, нелинейные системы.

Key words: power transmission, synchronization, step-up current stabilizer, GRID network, synergetic control, nonlinear systems.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее перспективной технологией передачи энергии является GRID сеть, которая позволяет обмениваться генерируемой и запасённой мощностью со всеми участниками сегмента. Использование такого способа энергетического взаимодействия способствует распространению альтернативных генерирующих источников и стимулирует установку частных аккумуляторных накопителей малой мощности. Наибольшая выгода достигается за счёт объединения всех элементов GRID инфраструктуры в общую сеть пользования, благодаря чему и осуществляется устойчивый энергообмен [1].

Для полноценного и эффективного взаимодействия с сегментом GRID нужно не только получать из его сети энергию, но и передавать в него заданную общими правилами генерируемую или запасённую мощность. Наиболее важной проблемой передачи электроэнергии является координация всех источников тока в локальном сегменте сети осуществляющуюся с помощью синхро-

низации преобразующего электронного оборудования. Следует учитывать так же что участники энергообмена считаются независимыми и степень их взаимодействия не должна регулироваться строго и носит лишь рекомендательный характер.

В основном, при построении электросистем снабжения постоянного тока с множеством источников на общейшине, применяется метод диспетчеризации и централизованного контроля мощности вырабатывающих устройств. Либо, если нет возможности управлять ими в реальном времени, применяется обычная стабилизация напряжения на каждом устройстве, а так как используется общая шина постоянного тока, то синхронизация значительно упрощается. При этом вырабатывающим устройствам достаточно не превышать заданное напряжение и номинальную мощность, т.к. распределение нагрузки будет неравномерным только при избыточной генерации, что является редким событием и не влияет на стабильность снабжения.

Для устойчивого управления сетью энергообмена всё же требуется согласованность подключённых к ней устройств, т.к. их роли не ограничиваются только выработкой из альтернативных источников, но и включают в себя накапливающие элементы, использующие разные типы аккумуляторов, резервные топливные генераторы и точки двустороннего обмена с централизованной стандартной электросетью. Сценарии использования этих элементов сети GRID должны быть регламентированы и задействованы в правильные интервалы времени, которые зависят от состояния всех событий на использующемся сегменте одновременно, в реальном времени и при неизвестной произвольно изменяющейся структуре.

Каждое задействованное в общей сети устройство должно иметь возможность собирать и вести статистику работоспособности и загруженности сегмента, к которому подключено. Это позволит расширить возможности применения сценариев работы динамически подстраиваемых с учётом особенностей текущей энергосети. Такое полностью децентрализованное управление значительно повысит живучесть системы обмена энергией и упростит ввод нового оборудования в строй по схеме: подключил – работает.

Интересно заметить, что использование альтернативных источников, таких как солнечные панели и ветровые установки, имеет дополнительную особенность их эксплуатации. В себестоимость оборудования закладывается ещё не состоявшаяся выработка электроэнергии, а это значит, что недополученная из них мощность уже оплачена. Таким образом получить наибольший эффект от использования такого оборудования можно только при быстром внедрении, непрерывной эксплуатации и использовании технологий преобразования с высоким КПД.

Использование GRID сети позволит получить наибольшую возможную выгоду от использования генерирующего и накапливающего оборудования. Использующийся механизм перераспределения энергии, при росте сегмента или его подключении к другим энергосетям, обеспечит непрерывную выработку от альтернативных генераторов и сбалансирует работу накопительного оборудования для повышения срока его службы.

II. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ, КОММУНИКАЦИЙ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Основным способом доставки электроэнергии в GRID систему является электропровод, осуществляющий передачу напряжения постоянного тока между пользовательским оборудованием и точкой доступа GRID сети. Расчёты проводятся без учёта параметров самой точки доступа, её средств защиты и мониторинга, т.к. она является универсальной и может позволить подключение устройств с меньшими параметрами мощности [2].

Стандартное сетевое напряжение 220 В имеет пиковое значение амплитуды $V_{NOM} = 220 \times \sqrt{2} \approx 311,12\text{B}$. Предположим, что потребительский инвертор, получающий напряжение из GRID сегмента, обладает номинальным КПД $\eta_{INV} = 98\%$ и максимальным рабочим циклом $D_{MAX} = 95\%$, то можно определить минимальное допустимое напряжение на его входе:

$$V_{IN} = \frac{V_{NOM} \times 100\% \times 100\%}{\eta_{INV} \times D_{MAX}} = \frac{311,12 \times 100 \times 100}{98 \times 95} \approx 335\text{B}. \quad (1)$$

Если считать, что пиковая нагрузка, требуемая для подключённого пользователя W_{MAX} будет составлять 5кВт, а длина медного $p = (1,75e-8)$ соединительного кабеля $L_{LINE} = 100\text{m}$ (две жилы по 50м) с сечением $S_{LINE} = 19,635\text{mm}^2$ сопротивление которого будет:

$$R_{LINE} = p * \frac{L_{LINE}}{S_{LINE}} = (1,75e-8) * \frac{100}{19,635e-6} \approx 0,089\Omega, \quad (2)$$

следовательно, при доступном потребительском оборудовании с минимальным входным напряжением, можно рассчитать минимальное напряжение точки входа GRID сегмента с учётом подводимого кабеля:

$$R_{INV} = \frac{V_{IN}^2}{W_{MAX}} = \frac{335^2}{5000} \approx 22,5\Omega \quad (3)$$

$$V_{MIN} = \frac{V_{IN} \times (R_{LINE} + R_{INV})}{R_{INV}} = \frac{335 \times (0,089 + 22,5)}{22,5} \approx 337\text{B},$$

где R_{INV} – сопротивление потребительского оборудования и инвертора при нагрузке W_{MAX} .

Для определения текущего КПД η_{REG} экспериментального устройства при передаче мощности в GRID сеть выполним его расчёты при известных параметрах оборудования, как $R_{MOS} = 0,29\Omega$ – сопротивление на транзисторах, $R_L = 0,03\Omega$ – сопротивление дросселя и $R_{OUT} = 0,056\Omega$ – сопротивление провода после стабилизатора и ранее известной мощностью и номинальным напряжением:

$$\begin{aligned} I_{MAX} &= \frac{W_{MAX}}{V_{NOM}} = \frac{5000}{311,12} \approx 16,07\text{A}; \\ P_{REG} &= (R_{MOS} + R_L + R_{OUT}) \times (I_{MAX})^2 + P_{LEAK} = \\ &= (0,29 + 0,03 + 0,056) \times (16,07)^2 + 5 \approx 102,1\text{Bm}; \\ \eta_{REG} &= \frac{W_{MAX} - P_{REG}}{W_{MAX}} \times 100\% = \frac{5000 - 102,1}{5000} \times 100 \approx 97,9\% \end{aligned} \quad (4)$$

где I_{MAX} – максимальный ток регулятора и P_{LEAK} – приблизительное собственное потребление управляющей и силовой электроники.

Установленная ёмкость идеального конденсатора на выходе стабилизатора должна удерживать пульсации напряжения в пределах $V_{PULSE} = 0,3\text{B}$ при частоте его работы $F_{CYCLE} = 20\text{kГц}$. Расчёт ёмкости с исходящим током I_{OUT} и максимальным рабочим циклом D_{CYCLE} , с учётом внутреннего сопротивления стабилизатора $R_{REG} = R_{MOS} + R_L = 0,32\Omega$ и максимально возможным напряжением на выходе $V_{MAX} = 400\text{B}$, выполним по формуле:

$$\begin{aligned} D_{CYCLE} &= 1 - \frac{V_{NOM} - (I_{MAX} \times R_{REG})}{V_{MAX}} = 1 - \frac{311,12 - (16,07 \times 0,32)}{400} \approx 0,235 \\ I_{OUT} &= I_{MAX} \times (1 - D_{CYCLE}) = 16,07 \times (1 - 0,235) \approx 12,34\text{A}, \\ C_{OUT} &= \frac{I_{MAX} \times D_{CYCLE}}{V_{PULSE} \times F_{CYCLE}} = \frac{12,3 \times 0,235}{0,3 \times 20000} \approx 482\text{мКФ}. \end{aligned} \quad (5)$$

Влияние внутреннего сопротивления конденсаторов далее не будет рассмотрено, т.к. зависит от их параллельно включённого количества, пульсаций тока, рабочего цикла D и количества фаз самого устройства, но можно сказать, что при наихудших параметрах не должно превышать $0,05\Omega$ для всей сборки, поэтому реальное значение V_{PULSE} может достигать 1 вольта.

III. СИНХРОНИЗАЦИЯ НЕЗАВИСИМЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ ТОКА

Так как сегмент GRID ограничивается максимальным напряжением $V_{MAX} = 400\text{B}$, чтобы попасть в стандартный потребительский диапазон напряжений, не требующий особой изоляции кабеля и дорогостоящих электронных компонентов. Тогда транспортная линия в точке подключения клиента сможет работать с напряжением в пределах 337–400 B, с учётом V_{MIN} из (3). Благодаря такой особенности передачи энергии и учитывая, что линия является транспортной изменяется напряжения в полученном диапазоне можно использовать для синхронизации питающих GRID стабилизаторов тока.

Так как одновременно подключенные к сегменту сети устройства снабжения энергией могут иметь разные мощностные характеристики, то введём шкалу управления их током на основе диапазона транспортной линии.

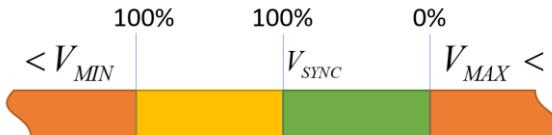


Рис. 1. Шкала управления стабилизацией тока

Можно заметить, что, как показано на рис. 1, диапазон от минимального до максимального напряжения разделён значением V_{SYNC} , которое является начальным напряжением синхронизации стабилизаторов тока в общей сети, делит шкалу пополам и вычисляется:

$$V_{SYNC} = V_{MIN} + \frac{V_{MAX} - V_{MIN}}{2} = 337 + \frac{400 - 337}{2} = 368,5B. \quad (6)$$

Таким образом стабилизатор тока определяет, что до значения V_{SYNC} на линии GRID он должен отдавать максимально возможный ток, а после неё действует режим регулирования, значение мощности которого можно выразить в процентном соотношении и получить:

$$I_{\%} = \frac{V_{MAX} - V_{SYNC}}{100\%} = \frac{400 - 368,5}{100} = 0,315, \quad (7)$$

из чего следует что по мере повышения напряжения до V_{MAX} запрос тока общей линией уменьшается до 0%.

Устройства, получающие энергию из GRID сети могут взаимодействовать с ней при значениях напряжения на протяжении всей синхронизационной шкалы. Однако должны учитывать, что при снижении значения линии ниже V_{SYNC} , общая выработка будет ниже необходимого для потребления уровня. Это означает что устройства накопления могут начать отдачу своей мощности с учётом заданных параметров автономности и используемого типа аккумуляторов, вплоть до запуска топливных генераторов если они имеются. Шкала $V_{MIN} \Leftrightarrow V_{SYNC}$ определяет степень их включённости в процесс поддержки GRID сегмента.

Если значение на линии становится меньше V_{MIN} , то сегмент GRID считается несостоявшимся или повреждённым. Необходимо увеличить в нем число генерирующих устройств, либо аккумулирующих накопителей, в зависимости от причины неработоспособности сети. Наличие таких устройств можно определить статистически при длительной работе сегмента, а также заранее рассчитать их при новом подключении клиентов (просьюмеров), с учётом местности их развертывания.

Важно заметить, что генерирующие устройства даже после преодоления значения V_{SYNC} могут продолжить вырабатывать максимум заявленной мощности если это необходимо их конструкционной особенностью. Например, ветрогенераторы для нормальной работоспособности должны перенаправить избыток на балластную нагрузку, поэтому они могут продолжить снабжать сеть

GRID вплоть до достижения значения V_{MAX} . При этом статистика на основе диапазона $V_{SYNC} \Leftrightarrow V_{MAX}$, которая сообщает об уровне переизбытка выработки, не пострадает, так как порывы ветра носят временный и региональный характер.

Таким образом любое новое или уже используемое устройство в общей сети GRID опираясь на шкалу $V_{MIN} \Leftrightarrow V_{SYNC} \Leftrightarrow V_{MAX}$ способно определять уровень своего участия в энергообмене, вести статистику выработки, потребления и накопления, подстраивать параметры сценариев взаимодействия с сегментом на её основе с учётом полученных ранее данных. Шкала управления стабилизацией теперь примет подробный вид на рис. 2.

Отдача в сеть	V_{ERROR}	V_{MIN}	V_{BUF}	V_{SYNC}	V_{MAX}	V_{OVER}
Солнечный генератор:	OFF	100% 100%		100% 100%	0% 0%	OFF
Ветрогенератор:	OFF	100% 100%		100% 100%	100% 0%	OFF
Буферные накопители:	OFF	100% 100%	100% 100%	0% 0%	0% 0%	OFF
Постоянные накопители:	OFF	100% 100%	0% 0%	0% 0%	0% 0%	OFF
Городская электросеть:	OFF	100% 100%	100% 0% условие	0% 0%	0% 0%	OFF
Аварийные генераторы:	OFF	100% 0% мин. время	0% 0%	0% 0%	0% 0%	OFF

Накопление	V_{ERROR}	V_{MIN}	V_{BUF}	V_{SYNC}	V_{MAX}	V_{OVER}
Буферные накопители:	OFF	0% 0%	0% 0%	0% 100%	100% 100%	OFF
Постоянные накопители:	OFF	0% 0%	0% 0%	0% 100%	100% 100%	OFF
Городская электросеть:	OFF	0% 0%	0% 0%	0% 0%	100% 100%	OFF

Рис. 2. Подробная шкала управления стабилизацией тока

Были введены дополнительные параметры: V_{ERROR} – напряжение, ниже которого регистрируется неисправность сегмента и его невозможность дальнейшей эксплуатации, можно ограничить уровнем V_{NOM} ; V_{BUF} – напряжение при котором происходит синхронизация накопителей и определяется участие внешней сети, задаётся как $(V_{MAX} - V_{MIN}) / 3$; V_{OVER} – перенапряжение сети при котором должны сработать аварийные предохранители, обычно не превышает предел напряжения в компонентах силовой электроники и в данном случае может быть задано до 425 вольт. Значение V_{SYNC} в данной шкале будет равно $2 \times (V_{MAX} - V_{MIN}) / 3$, так как зона $V_{MIN} \Leftrightarrow V_{MAX}$ теперь разделена на три сегмента.

Определённые условия накладываются на некоторое оборудование. Аварийные генераторы не могут запуститься быстро, поэтому требуется гистерезис у значения V_{MIN} для его подготовки, который зависит от типа генератора и статистики участка при переходе в аварийный режим. Нужно так же отработать его минимальное активное время, для сглаживания сетевых проблем на участке $V_{MIN} \Leftrightarrow V_{BUF}$, ведь он и так уже запущен, а цикл старт/стоп ограничен конструкционным ресурсом и способом запуска.

Городская электросеть при условии недостаточной генерации, определённой из статистики, может подпитывать сегмент и после превышения значения V_{BUF} , чтобы восполнить запас аккумуляторных батарей, так как в данном случае образовалось исключительное условие. Определяется оно благодаря тому, что постоянные накопители будут снижать уровень отдаваемой мощности при изменении уровня своего заряда воздействием на на-

пряжение транспортной линии в пределах $V_{MIN} \Leftrightarrow V_{BUF}$, дополнительно выравнивая свой заряд относительно всех таких же накопителей на сегменте.

Влияние провода на измерения показаний напряжения транспортной линии можно оценить по формулам (2) и (3), из которой следует что отклонение в 0,5 вольта при текущих параметрах устройства и стандартном силовом кабеле 16мм^2 длиной 20м (две жилы по 10м) это примерно 0,8% погрешности. Из чего следует вывод о незначительном влиянии на измерения или возможность учесть это отклонение при меньшем сечении кабеля.

IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим повышающий преобразователь, электрическая схема которого представлена на рис. 3. С учетом допущений об идеальности элементов схемы и высокой частоты работы преобразователя можно составить усредненную математическую модель:

$$\begin{aligned}\frac{dU_1}{dt} &= \frac{1}{R_1 C_1} (V_1 - R_1 I_l - U_1); \\ \frac{dI_l}{dt} &= \frac{1}{L_1} (U_1 - (1-D)U_c - R_2 I_l); \\ \frac{dU_c}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left((1-D) I_l - \frac{U_c}{R_3} \right),\end{aligned}\quad (8)$$

где U_1 – напряжение на емкости C_1 , I_l – ток, протекающий через индуктивность L_1 , U_c – напряжение на выходе преобразователя, D – коэффициент заполнения периода следования импульса, $0 < D < 1$, R_2 , L_1 , C_2 – параметры преобразователя, V_1 – напряжение входного источника, R_1 , C_1 – параметры преобразователя, которыми можно пренебречь, т. к. устройство измерения U_1 снимает показания непосредственно с емкости C_1 , R_3 – сопротивление нагрузки преобразователя при известном заданном управлении не учитывается.

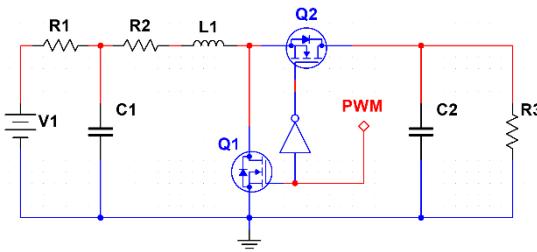


Рис. 3. Электрическая схема повышающего преобразователя

Постановкой задачи управления в данном случае будет стабилизация выходного тока преобразователя $I_l = I_l^0$ при известном, изменяющемся во времени значении I_l^0 , получаемом из (7).

V. ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА

Для решения задачи управления данным преобразователем и решения задачи стабилизации выходного тока преобразователя $I_l = I_l^0$ будем использовать синергетический подход, разработанный профессором А.А. Колесниковым. Ранее методы синергетической теории управ-

ления (СТУ) неоднократно применялись для синтеза алгоритмов управления различными типами электрических преобразователей [3–5], однако в данных процедурах синтеза не учитывались особенности функционирования этих преобразователей в сетях GRID. В работе [6] был выполнен синтез алгоритма управления данным типом преобразователя с учетом функционирования в сети GRID, но при решении задачи стабилизации напряжения на выходе преобразователя. Как ранее нами было отмечено, для более эффективного решения задач управления сетью GRID целесообразно обеспечивать стабилизацию тока на выходе используемых преобразователей. Поэтому при решении данной задачи в соответствии с основным методом СТУ – методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [7], для математической модели (8) введем в рассмотрение макропараметрую:

$$\psi_1 = I_l^0 - I_l, \quad (9)$$

учитывающую технологический инвариант для системы стабилизации тока на выходе преобразователя $I_l = I_l^0$. В соответствии с процедурой метода АКАР эта макропараметрую должна удовлетворять решению $\psi_1 = 0$ основного функционального уравнения

$$T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 = 0, \quad (10)$$

где T_1 – постоянная времени, определяющая время попадания изображающей точки замкнутой системы в окрестность инвариантного многообразия $\psi_1 = 0$. Очевидно, что для обеспечения асимптотической устойчивости решения уравнения (10), необходимо и достаточно чтобы $T_1 > 0$. Из совместного решения (9) и (10), с учетом модели преобразователя (8), получим выражение для управляющего воздействия – коэффициента заполнения последовательности импульсов:

$$D = -\frac{U_1 T_1 - I_l^0 L_1 + I_l L_1 - U_c T_1 - I_l R_2 T_1}{U_c T_1}. \quad (11)$$

Таким образом нами синтезирован синергетический регулятор (11) для повышающего преобразователя, описываемого математической моделью (8), который обеспечивает стабилизацию выходного напряжения $I_l = I_l^0$ при известном значении управляемого тока. При этом легко убедиться, что в синтезированной системе управления будет гарантироваться выполнение условий асимптотической устойчивости. Однако алгоритм управления (11) не является инвариантным к действию внешних и внутренних возмущений. А так как компоненты электронного оборудования не идеальны и могут изменять свои параметры как из-за несовершенства технологии изготовления, так и от старения, а также необходимо учитывать, что на работу преобразователя безусловно будет оказывать существенное влияние нагрузка этого преобразователя, то для повышения адаптивности проектируемой системы к действию таких возмущений используем метод интегральной адаптации на инвариантных многообразиях [7, 8], зарекомендовавший себя при проектировании робастных и инвариантных к действию возмущений систем управления различными классами сложных нелинейных объектов. В рамках разработанной

процедуры метода интегральной адаптации на инвариантных многообразиях расширим исходную математическую модель преобразователя (8) уравнением оценки внутренних и внешних возмущений:

$$\begin{aligned} \frac{dI_l}{dt} &= \frac{1}{L_1} \left(U_1 - (1-D)U_c - R_2 I_l \right) + z; \\ \frac{dU_c}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left((1-D)I_l - \frac{U_c}{R_3} \right); \\ \frac{dz}{dt} &= \eta (I_l^0 - I_l), \end{aligned} \quad (12)$$

где z – переменная интегральной оценки возмущений, а η – коэффициент её воздействия. Тогда для математической модели (12) макропеременная (9) целесообразно представить в следующем виде:

$$\psi_1 = I_l^0 - I_l - z. \quad (13)$$

Тогда применяя процедуру синтеза с учетом введенной макропеременной (13), функционального уравнения (10) и модели синергетического синтеза (12) получим динамическую структуру адаптивного алгоритма управления:

$$\begin{aligned} D &= -\frac{1}{U_c T_1} (L_1 T_1 \eta - L_1 I_l T_1 \eta + L_1 T_1 z - I_l R_2 T_1 + \\ &+ U_1 T_1 - I_l^0 L_1 + I_l L_1 + L_1 z - U_c T); \\ z &= \eta \int (I_l^0 - I_l) dt. \end{aligned} \quad (14)$$

Полученный динамический алгоритм стабилизации повышающим преобразователям в условиях функционирования в динамически меняющейся среды сети GRID гарантирует высокоточное выполнение заданной технологической задачи, асимптотическую устойчивость синтезированной замкнутой системы управления, рабочесть, а также инвариантность к действию неизмеряемых возмущающих воздействий.

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для подтверждения полученных теоретических результатов было проведено моделирование синтезированной системы управления повышающим стабилизатором тока (8), (14). При моделировании использовались параметры преобразователя, представленные в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Параметр	Значение	Ед. изм.	Параметр	Значение	Ед. изм.
R_1	0,01	Ом	R_2	0,32	Ом
C_1	$482 \cdot 10^{-6}$	Ф	C_2	$50 \cdot 10^{-6}$	Ф
L_1	$470 \cdot 10^{-6}$	Гн	V_1 и U_1	311	В

Параметры синтезированного регулятора и наблюдателя при моделировании были выбраны следующие: $T_1 = 0,0001$, $\eta = -100$.

Моделирование проводилось в условиях воздействия кусочно-постоянного неизмеряемого изменения сопротивления нагрузки. Задачей управления является стабилизация тока на выходе преобразователя $I_c^0 = I_{MAX} \times I\%$. При моделировании учитывались ограничения, накладываемые на формируемое управляющее воздействие:

$$d = \begin{cases} 0,8, & \text{при } d \geq 0,8 \\ d, & \text{при } 0 < d < 0,8 \\ 0, & \text{при } d \leq 0 \end{cases}.$$

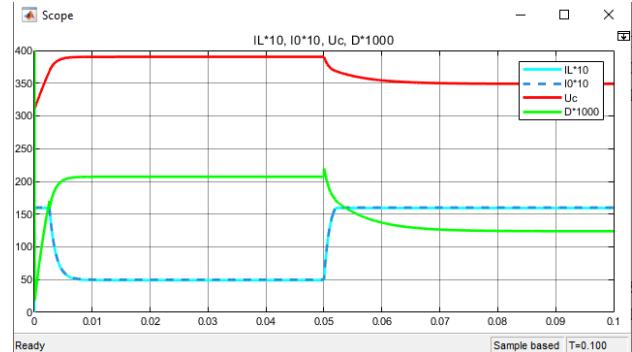


Рис. 4. Переходные процессы координат системы и управления

Из результатов моделирования, представленных на рис. 4, можно сделать вывод, что замкнутая система обеспечивает поддержание заданного тока на выходе преобразователя, при этом изменение сопротивления нагрузки оказывает влияние на выходное напряжение, что приводит к незначительным отклонениям от заданного состояния, однако после окончания переходного процесса ток стабилизируется в заданном состоянии.

VII. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ GRID СЕТИ

Сегмент GRID системы в реальности не может обладать чёткой структурой, т.к. его пользователи – это домохозяйства с постоянно меняющимися потребностями, которые подключены произвольным образом и их число не детерминировано. Основной его задачей является обеспечение всех участников постоянной и стабильной электроэнергией, сохранение устойчивости работы всей сети при нарушениях на локальных участках, возможность подключения к сегменту в любом месте и в любое время, поддержание работоспособности областей сети даже при их изоляции и взаимодействие элементов друг с другом полностью децентрализовано.

В любом случае необходимо получать статистику от устройств в GRID системе, чтобы отслеживать потребление и выработку электроэнергии, при этом для ведения её учета в общей системе достаточно измерений в точке доступа пользователя, т.к. в ней будет отражена совокупность генерирующих и потребляющих устройств. Такой механизм сможет собирать данные всех участков, формировать рекомендации по улучшению структуры и прогнозировать возникновение проблемных зон.

Основной идеей предлагается считать, что каждое устройство в сети является независимым, даже если несколько из них принадлежат одному пользователю, подключённому через единственную точку доступа к GRID. Такое представление структуры позволяет полностью децентрализовать управление оборудованием и максимально увеличить живучесть как участка, так и всей сети в целом.

Участие в организации GRID налагает и некоторую ответственность, не только ограничивающую размещением и обслуживанием оборудования пользователем, но и ведением учета энергообмена. Взаимодействие по-

потребителей услуг с GRID сегментом должно регламентироваться законодательно и на контрактной основе. Оператор участка сети заключает договор с пользователями и обязуется обслуживать электротранспортную инфраструктуру, обеспечивать новых пользователей доступом к сети и контролировать учет платного энергообмена.

Существующие локальные низковольтные солнечные и ветровые электростанции так же могут быть использованы как элементы GRID сети, но потребуют специального гальванически развязанного преобразовательного оборудования. Городская электросеть сможет участвовать в энергосети в двух вариантах: 1) резервная система питания, на которую переключается пользователь при неустранимых неполадках GRID участка; 2) вспомогательная линия, использующаяся для подмешивания платной электроэнергии в пользовательский инвертор при недостатке мощности в GRID транспортной сети.

На работоспособность транспортной линии заметно влияет длина и качество электрокабеля. При этом он не подвержен проблемам рассеивания, наведения и не имеет реактивного сопротивления, т.к. использует постоянный ток. Но это GRID система, в которой каждый пользователь генератор, накопитель и потребитель одновременно, то нагрузка распределится равномерно благодаря произвольной структуре объединения. Чем выше число связей с ближайшими участниками, естественно обоснованное экономически, тем надёжнее и эффективнее работоспособность всей сети.

VIII. РАБОТАЮЩЕЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Для участия в энергообмене между множеством устройств на общейшине постоянного тока необходимо разработать двунаправленный преобразователь тока.



Рис. 5. Двунаправленный преобразователь тока

На рис. 5 показан рисунок макета силовой фазы двунаправленного преобразователя тока. Такое устройство является основной частью оборудования энергообмена с GRID сетью и количество таких фаз увеличивает мощность энергоустановки.

Принципиальная схема (рис. 6) преобразователя имеет модифицированный вид, из которого можно заметить наличие отключающего транзистора Q3, токоизмерительного шунта R1 и дополнительных быстродействующих диодов D1 и D2. Такое дополнение обеспечивает возможность электронно отключать выбранную фазу от транспортной линии, а также уменьшить потери в дросселе при переключении транзисторов в рабочем цикле.

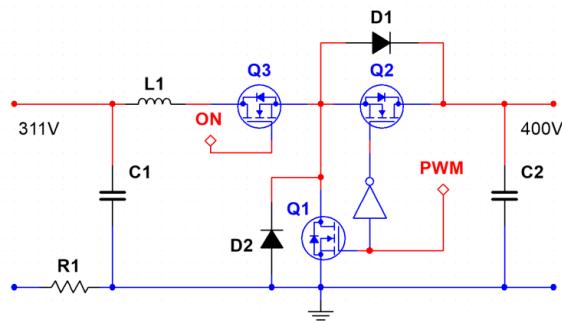


Рис. 6. Схема силового участка фазы преобразователя

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в работе были рассмотрены популярные методы синхронизации устройств на общей шине и показан наиболее перспективных подход к этой задаче с учётом невозможности прямого общения между участниками энергообмена. Проведены расчёты параметров устройств и их ожидаемых характеристик. Представлена процедура синтеза алгоритма управления повышающим стабилизатором тока на основе синхронизации транспортной линии. Моделирование показало полную состоятельность предложенного варианта взаимодействия в идеальных условиях. Такого типа системы могут стать основой для построения GRID сети, так как гарантируют не только выполнение технологических задач управления в условиях неопределенности, но и обеспечивают асимптотическую устойчивость синтезированной замкнутой системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова И.О., Кобец Б.Б. Роль распределенной генерации в реализации концепции Smart Grid // Журнал «ЭКО». – 3 (4). – С. 90. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2011-4-87-93.
2. Плотников Ю.В. Методика расчета источника питания приборов мониторинга и учета электроэнергии тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения // Омский научный вестник. – 2021. – № 2 (176). – С. 43-44. – DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-41-45.
3. Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov A., Monti A., Ponci F., Santi E., Dougal R. Synergetic Synthesis Of Dc-Dc Boost Converter Controllers: Theory And Experimental Analysis // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE Vol. 1. – DOI: 10.1109/APEC.2002.989278.
4. Santi E., Monti A., Li D., Proddutur K., Dougal R. Synergetic Control for DC-DC Boost Converter: Implementation Options // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1803-1813.
5. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В. Синергетические методы управления сложными си-системами: Энергетические системы / под общ. ред. А.А. Колесникова. Изд. стереотип. URSS. 2019. – 248 с.
6. Sklyarov S.A., Veselov G.E. Synergistic Power Distribution Control in a GRID System with a Boost Converter // 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. – P. 38-41. – DOI: 10.1109/CTS59431.2023.10288741.
7. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
8. Колесников А.А., Колесников А.А., Кузьменко А.А. Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 9. – С. 579-589.

Оценка помехоустойчивости информационных каналов при случайных импульсных помехах

Светлов Михаил Семенович
Лаборатория системных проблем
управления и автоматизации
в машиностроении
Институт проблем точной механики
и управления РАН
Саратов, Россия
svetlovms@yandex.ru

Львов Алексей Арленович
Институт электронной техники
и приборостроения
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
alvova@mail.ru

Багаев Игорь Сергеевич
Институт электронной техники
и приборостроения
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
ig.bagaev@yandex.ru

Мартиросян Давид Мартиросович
Институт прикладных
информационных технологий
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
deadman0@yandex.ru

Мартиросян Арман Мартиросович
Институт прикладных
информационных технологий
Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
treiyzer164@yandex.ru

Хасанов Семен Тимурович
Школа прикладной математики
и информатики
Московский физико-технический
институт (Национальный
исследовательский университет)
Москва, Россия
hassimon23@gmail.com

Аннотация: Рассмотрены вероятностные характеристики помехоустойчивых информационных каналов при действии в канале связи случайных импульсных помех различной интенсивности. Предложена упрощенная оценка вероятности ложного приема при использовании неодвоичных (K -ичных) корректирующих кодов, обнаруживающих и/или исправляющих ошибки трансформации и/или стирания.

Abstract: The probabilistic characteristics of the information channels noise immunity under the action of various intensities random pulse interference in the communication channel are considered. A simplified estimate of the false reception probabilities proposed when using non-binary (K -ary) correction codes that detect and/or correct transformation and/or erasure errors.

Ключевые слова: информационный канал, помехоустойчивость, корректирующий код, вероятности исходов приема, коэффициент ложного приема, достоверность передачи.

Keywords: *information channel, noise immunity, correction code, accuracy of reception outcomes, false reception coefficient, transmission reliability.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные информационные каналы (ИК), структурно содержащие каналы связи (КС) и кодеки (КДК) – устройства кодирования (КУ) и декодирования (ДКУ), – являются неотъемлемой частью информационно-управляющих и информационно-измерительных систем (ИУС, ИИС) различного функционального назначения. Именно ИК определяют их помехоустойчивость, обеспечивая достоверный прием информации в условиях ограничений и неконтролируемых внешних воздействий со стороны КС, в частности помех в виде случайных сигналов [1–3].

В общем случае в КС действуют и флюктуационные, и импульсные помехи. Борьба с флюктуационными помехами, основной характеристикой оценки которых является отношение «сигнал/помеха» («сигнал/шум» – ОСШ), обычно достаточно успешно может быть организована до ДКУ на выходе КС за счет реализации алгоритмов приема с пороговым контролем амплитуды и длительности входных (канальных) сигналов [4–6]. Что же касается импульсных помех, то наиболее опасна для цифровых ИК случайная импульсная помеха (СИП), так как она представляет собой последовательность импульсов, параметры которых сравнимы с соответствующими параметрами импульсов рабочего кода. Поэтому именно СИП за счет практического равенства энергий импульсов кода и помехи оказывает наиболее эффективное негативное воздействие на ДКУ, нарушающее их нормальное функционирование, что требует введения специальных мер по обеспечению требуемого уровня достоверности передачи информации.

Особый интерес представляют модели ИК при использовании неодвоичных (K -ичных) корректирующих кодов, обнаруживающих и/или исправляющих ошибки трансформации и/или стирания. Для таких моделей существенно усложняются (по сравнению с моделями ИК при двоичных кодах) вычисления вероятностей исходов приема. Это, в первую очередь, касается моделей ИК общего вида, когда рассматриваются помехи, приводящие к возникновению ошибок не только отдельного типа (трансформации или стирания), но и к их совместному воздействию на прием информации в канальном ДКУ.

Дополнительные сложности определения вероятностей исходов приема возникают в моделях ИК при необходимости исследования особенностей процедур кодирования-декодирования, учитывающих различия оце-

нок границ избыточности, в частности границ избыточности K -ичных корректирующих кодов по Хеммингу, Плоткину, Варшамову, Гилберту.

В этих случаях, как показывают исследования моделей ИК с различными типами канальных кодов, особые сложности возникают при синтезе ИК, использующих в качестве рабочих кодов псевдослучайные недвоичные последовательности, требующие учета их корреляционных свойств при определении вероятностей исходов приема информации канальным ДКУ.

В этом смысле, предложенные в настоящей работе упрощенные формулы вычисления вероятностей, в первую очередь, ложного приема, что особенно важно для определения категории ИК по достоверности приема информации.

II. ИНТЕНСИВНОСТЬ СЛУЧАЙНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПОМЕХИ

СИП представляет собой хаотичную импульсную последовательность, в которой интервалы времени следования импульсов или моменты времени появления импульсов подчиняются какому-либо закону случного распределения по времени. В качестве основного критерия верности оценки воздействия на канальные коды целесообразно использовать интенсивность $i_{\text{сп.}}$ СИП, характеризующую помеху с точки зрения числа импульсов, попадающих на базу кода [7]:

$$i_{\text{сп.}} = \frac{T_6}{T_{\text{сп.}}} = \frac{f_{\text{сп.}}}{f_k}, \quad (1)$$

где T_6 и $T_{\text{сп.}}$ — базовое время кода и средний период следования СИП, соответственно, а f_k и $f_{\text{сп.}}$ — частота кодовых посылок в КС и средняя частота следования импульсов помехи, соответственно.

Как следует из формулы (1), этот критерий дает количественную оценку воздействия СИП на канальный код. В теории помехоустойчивого кодирования методы и способы обеспечения помехоустойчивости ИК классифицируются в зависимости от интенсивности $i_{\text{сп.}}$ СИП в КС. При этом рассматриваются ИК, работающие в условиях действия помех малой ($i_{\text{сп.}} < 1$ или $i_{\text{сп.}} \ll 1$), средней ($i_{\text{сп.}} = 1/2$ или $i_{\text{сп.}} = 1/3$), большой ($i_{\text{сп.}} \geq 3$) интенсивности. Более подробно эта классификация, а также соответствующие методы обеспечения помехоустойчивости ИК при различных значениях величины интенсивности СИП приведены в [8].

Анализ современных ИК в составе многочисленных используемых цифровых ИУС и ИИС, а также в сетевых структурах различного функционального назначения, в том числе в цифровых системах телерadiовещания, позволяет сделать вывод о том, что в большинстве случаев ИК работают в условиях действия в КС СИП средней и большой интенсивности. Для таких ИК характерно использование достаточно мощных корректирующих кодов при каскадной структуре КДК, что дает возможность получить требуемые показатели информационной надежности. Одновременно следует отметить, что для обеспечения высокого уровня помехоустойчивости в

ИК должен быть реализован последовательный синхронный интерфейс, характеризующийся необходимостью синхронно-синфазной работы (синхронизации) КУ и ДКУ каждого соответствующего КДК. При структуре однокаскадных КДК такой режим работы КУ и ДКУ требует применения принципов циклической синхронизации или самосинхронизации. Принцип циклической синхронизации обеспечивается за счет формирования в КУ специального синхросигнала (пускового кода), передаваемого в КС перед каждой рабочей кодовой посылкой. Принцип формирования синхросигнала зависит от интенсивности помех в КС, в условиях которых функционирует ИК. Одновременно в ДКУ должны быть реализованы помехоустойчивый прием синхросигнала и режим временной отсечки, обеспечивающий стробирование принимаемого кода по каждой временной позиции. При структуре многокаскадных КДК работа соответствующих КУ и ДКУ всех каскадов за исключением канального каскада строится на принципе циклической синхронизации, а канальные КУ и ДКУ, как правило, работают в режиме самосинхронизации, например, с использованием кода с кодовым сигнальным признаком (КСП). Подробно код с КСП, его синтез, а также алгоритмы кодирования и декодирования описаны в [9–12].

Вопросы реализации последовательного синхронного интерфейса в ИК не являются темой настоящей работы. Учитывая это, при оценке базового времени T_6 кода рассматриваются только элементы рабочего кода без элементов синхросигнала. Таким образом, если используется n -элементный (n -разрядный) позиционно-импульсный канальный код с полным заполнением позиций и с длительностью τ позиций, то базовое время кода определяется как

$$T_6 = n\tau. \quad (2)$$

В случае применения в качестве канального кода n -разрядного кода с КСП его базовое время определяется по формуле

$$T_6 = \Delta t_0 + (n-1)\Delta t, \quad (3)$$

где Δt_0 — интервал времени в канальном КУ кода с КСП между моментами времени начала работы КУ и формирования первого элемента кода в КС; Δt — длительность интервалов времени между рабочими позициями канального кода с КСП; при этом $\Delta t_0 \neq k_t \Delta t$ ($k_t = 1, 2, \dots, n-1$) [13].

Как было сказано выше, в ИК в условиях действия СИП средней и большой интенсивности практически всегда применяются корректирующие коды, способные обнаруживать и/или исправлять возникающие в КС ошибки. Будем для общности считать, что в ИК используются K -ичные ($K=0, 1, 2, \dots, K-1$) n -разрядные избыточные коды ($n = m+k$), формирующие $M = K^m$ рабочих кодовых слов с числом m информационных разрядов и числом k контрольных (избыточных) разрядов (M — информационная емкость кода).

Для систематических разделимых кодов коэффициент избыточности R определяется как

$$R = \frac{k}{n} = \frac{n-m}{n} = 1 - \frac{m}{n}. \quad (4)$$

Для неразделимых кодов коэффициент избыточности может быть определен по формуле:

$$R = \frac{M_{\max} - M}{M_{\max}} = \frac{K^n - K^m}{K^n} = 1 - \frac{K^m}{K^n}, \quad (5)$$

где M_{\max} – максимальная информационная емкость кода.

В формулах (4) и (5) $\frac{m}{n}$ и $\frac{K^m}{K^n}$ характеризуют, соответственно, скорости кодирования для КУ с систематическими разделимыми и для КУ с неразделимыми кодами.

Заметим, что, как следует из формул (4) и (5), с увеличением скорости кодирования при одних и тех же параметрах кода его избыточность, следовательно, и помехоустойчивость снижаются.

Если в общем случае считать, что помехи в КС приводят к ошибкам и трансформации, и стирания, то корректирующая способность кода может быть определена значением d_{\min} его минимального кодового расстояния:

$$d_{\min} = r + s + e_{pf} + e_{cr} + 1, \quad (6)$$

где r и e_{pf} – кратности обнаружения ошибок трансформации и стирания, соответственно, а s и e_{cr} – кратности исправления ошибок трансформации и стирания, соответственно.

Подробный анализ возможных вариантов реализации корректирующей способности кода на основе формулы (6) проведен в [13, 14].

I. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИК

В общем случае, рассматривая ИК как разомкнутую структуру, состоящую из последовательной совокупности КУ, КС и ДКУ, можно сказать, что правильный прием передаваемой информации зависит от надежной и безотказной работы указанных структурных элементов ИК, а также от интенсивности и характера воздействия СИП на рабочий сигнал в КС. Учитывая это, нормальное функционирование ИК можно охарактеризовать следующим соотношением вероятностных показателей:

$$P_{\text{н.ф.}} = P_{\text{КУ}} P_{\text{ДКУ}} P_{\text{КС}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{н.ф.}}$ – вероятность нормального функционирования ИК; $P_{\text{КУ}}$ и $P_{\text{ДКУ}}$ – вероятности исправной работы КУ и ДКУ, соответственно; $P_{\text{КС}}$ – вероятность прохождения рабочего кодового сигнала по КС без искажений. Вероятности $P_{\text{КУ}}$ и $P_{\text{ДКУ}}$ исправной работы, соответственно, КУ и ДКУ в реальных условиях зависят от многих различных факторов, в том числе от их аппаратурной надежности и надежности используемого программного обеспечения. Анализ и оценка этих параметров требуют знания конкретных вариантов построения

КУ и ДКУ, что не рассматривается в данной работе. Однако влияние этих устройств на информационную надежность ИК в целом должно быть учтено. С этой целью будем считать, что косвенно ненадежность КУ и ДКУ учитывается в вероятностных характеристиках СИП в КС. В этом смысле логично рассматривать вероятность $P_{\text{КС}}$ прохождения рабочего кодового сигнала по КС как вероятность $P_{\text{пр}}$ правильного приема в ИК. В общем случае, рассматривая ИК как разомкнутую структуру, состоящую из последовательной совокупности КУ, КС и ДКУ, можно сказать, что правильный прием передаваемой информации зависит от надежной и безотказной работы указанных структурных элементов ИК, а также от интенсивности и характера воздействия СИП на рабочий сигнал в КС. Учитывая это, нормальное функционирование

Наиболее часто в качестве альтернативы правильному приему в современных ИК рассматриваются исходы приема сообщения в виде защитного отказа с вероятностью $P_{\text{з.о.}}$ и ложного приема (трансформации сообщения) с вероятностью $P_{\text{л.пр.}}$ [15].

Варианты помехи, приводящие к подделке сообщений в отсутствии передачи рабочей информации по КС, как правило, учитывать не целесообразно по ряду причин. Во-первых, в основных кодовых форматах используются многоразрядные кодовые посылки, подделка которых возможна при длинных последовательностях СИП, вероятность появления которых относительно не велика. Во-вторых, использование помехоустойчивых сигнальных признаков – частотного, полярного, фазового, кодового – также существенно снижает вероятность подделки сообщений. В-третьих, несмотря на близость сигналов СИП и рабочих сигналов по амплитуде и длительности, вероятность абсолютных их равенств крайне мала, что позволяет контролировать параметры сигналов на выходе КС. В-четвертых, при последовательном синхронном интерфейсе КДК в ИК крайне мала вероятность подделки специальных помехоустойчивых кодов синхропосылок, в связи с чем ложный запуск приемной схемы сигналом СИП практически исключен.

Таким образом, исходы приема – правильного и ложного приемов и защитного отказа – составляют полную систему независимых событий, следовательно,

$$P_{\text{пр}} + P_{\text{з.о.}} + P_{\text{л.пр.}} = 1. \quad (8)$$

Рассмотрим более подробно определение вероятности $P_{\text{пр}}$ правильного приема при действии СИП в КС. Математическое ожидание $M(\text{СИП})$ численно равно среднему количеству импульсов помехи, попадающих на базовое время кода:

$$M(\text{СИП}) = \sum_{i=1}^n x_i p_i = \frac{T_6}{T_{\text{с.п.}}}, \quad (9)$$

где x_i – число импульсов СИП в i -м интервале (отрезке) базового времени кода; p_i – вероятность того, что в i -м интервале базового времени кода окажется x_i импульсов СИП; n – общее число интервалов времени, на которое условно разделено базовое время кода. Такое условное

разделение необходимо для вычисления вероятности попадания определенного количества x_i (далее просто i) импульсов СИП на базу кода. При этом считаем, что попадания i импульсов в каждый из $\frac{T_6}{n}$ интервалов времени – независимые события, происходящие в КС в одних и тех же одинаковых условиях. Следует иметь в виду, что для большинства случаев число интервалов времени n можно считать количеством позиций (разрядов) используемого кода.

Для определения вероятности $P_{i,n}$ попадания произвольного числа i импульсов СИП на базовое время n -разрядного кода при вероятности p_0 попадания импульса помехи на каждом разряде кода – по сути, вероятности однократной ошибки в КС – чаще всего используется закон биномиального распределения:

$$P_{i,n} = C_n^i p_0^i (1-p_0)^{n-i}. \quad (10)$$

Как известно, математическое ожидание $M(\text{СИП})$ для биномиального распределения определяется как $M(\text{СИП})=np_0$, откуда вероятность p_0 однократной ошибки в КС может быть определена как:

$$p_0 = \frac{M(\text{СИП})}{n}. \quad (11)$$

С учетом формулы (11) формула (10) запишется в виде:

$$\begin{aligned} P_{i,n} &= C_n^i \left(\frac{M(\text{СИП})}{n} \right)^i \left(1 - \frac{M(\text{СИП})}{n} \right)^{n-i} = \\ &= \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-i+1)}{n^i} \frac{M(\text{СИП})^i}{i!} \frac{\left(1 - \frac{M(\text{СИП})}{n} \right)^n}{\left(1 - \frac{M(\text{СИП})}{n} \right)^i}. \end{aligned} \quad (12)$$

Если рассматривать многоразрядный код при достаточно большом значении параметра n , то вероятность попадания импульса помехи в интервал времени $\frac{T_6}{n}$ крайне мала, а в пределе стремится к нулю.

Тогда в пределе при $p_0 \rightarrow 0$, учитывая, что из (11) $n = \frac{M(\text{СИП})}{p_0}$, биномиальное распределение становится распределением Пуассона:

$$P_i = \frac{M(\text{СИП})^i}{i!} e^{-M(\text{СИП})}. \quad (13)$$

Формула (13) с учетом формул (1) и (9) может быть записана в виде:

$$P_i = \frac{i_{\text{с.п.}}^i}{i!} e^{-i_{\text{с.п.}}} \quad (14)$$

и тогда, имея в виду соотношения (2) и (11), а также учитывая, что уже при $p_0 \leq 0,1$ биномиальное распределение хорошо сходится с распределением Пуассона [16, 17], можно получить:

$$i_{\text{с.п.}} \leq 0,1n = 0,1 \frac{T_6}{\tau}. \quad (15)$$

С практической точки зрения формула (15) дает возможность определить границы корректного применения распределения Пуассона при оценке вероятностных характеристик помехоустойчивости ИК, в частности при вычислении вероятностей исходов приема.

Учитывая формулу (8), вероятность правильного приема $P_{\text{пр}}$ легко найти, зная вероятности $P_{\text{з.о.}}$ защитного отказа и $P_{\text{л.пр.}}$ ложного приема:

$$P_{\text{пр}} = 1 - (P_{\text{з.о.}} + P_{\text{л.пр.}}). \quad (16)$$

В формуле (16) сумма вероятностей защитного отказа и ложного приема характеризует недостоверную, ошибочную работу ИК, определяемую вероятностью $P_{\text{ош}}$ ошибочного приема:

$$P_{\text{ош}} = P_{\text{з.о.}} + P_{\text{л.пр.}}. \quad (17)$$

Для ИК в составе ИУС и ИИС в зависимости от категории систем по достоверности передачи установлены допустимые значения вероятностей из формулы (17) [18]:

$$P_{\text{з.о.}} \leq P_{\text{з.о.доп.}}; P_{\text{л.пр.}} \leq P_{\text{л.пр.доп.}}; P_{\text{ош}} \leq P_{\text{з.о.доп.}} + P_{\text{л.пр.доп.}}. \quad (18)$$

При синтезе ИК в зависимости от требований к ИУС или ИИС по категории достоверности передачи должны быть обеспечены вероятностные показатели в соответствии с неравенствами (18). При этом приоритетным является условие по вероятности ложного приема как самого нежелательного, а для многих систем недопустимого исхода приема.

II. УПРОЩЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ЛОЖНОГО ПРИЕМА

Традиционно в соответствии с классической теорией кодирования при оценке вероятностей исходов приема значение минимального кодового расстояния по Хеммингу определяется одинаково при любом основании используемого кодового алфавита. Однако такой подход ограничивает возможности построения ИК высокой помехоустойчивости, в связи с чем была предложена геометрическая модель недвоичных кодов, принципиально отличающаяся от классической (хемминговой) модели. Отличие состоит в том, что два любых ненулевых символа располагаются друг от друга на расстоянии не одного, а двух кодовых переходов. При этом любой ненулевой и нулевой символы расположены, как единичный и нулевой символы в двоичном кодовом алфавите, на расстоянии одного кодового перехода друг от друга [19]. С учетом такой кодовой метрики разработаны математические модели ИК повышенной помехоустойчивости, синтезированы алгоритмы и на их основе получены формулы расчета вероятностей исходов приема для КС с ошибками трансформации, стирания и общего вида с ошибками обоих типов для K -ичных кодовых алфавитов ($K=\{0, K_T=1, 2, \dots, K-1\}$) и K_T -ичных алфавитов (без использования нулевого сигнального признака) [20, 21].

Следует отметить, что расчет по синтезированным формулам вероятностей защитного отказа и ложного приема, особенно для каналов с ошибками общего вида при каскадных кодах достаточно высокой корректирующей способности, весьма затруднителен, поэтому остается актуальной задача упрощенной оценки вероятности ложного приема как наиболее критичной с точки зрения обеспечения достоверности требуемого уровня.

С этой целью введем в рассмотрение коэффициент α ложного приема (трансформации) как отношение числа ошибок $N_{\text{л.пр.}}$, приводящих к ложному приему сообщений, к общему числу возможных ошибок $N_{\text{ош.}}$:

$$\alpha = \frac{N_{\text{л.пр.}}}{N_{\text{ош.}}} . \quad (19)$$

Очевидно, что максимальное значение $P_{\text{л.пр.макс}}$ вероятности ложного приема при использовании корректирующего кода с некоторым значением d_{\min} минимального кодового расстояния будет тогда, когда на базовое время кода попадет число импульсов СИП, кратное значению d_{\min} :

$$P_{\text{л.пр.макс}} = \sum_{i=1}^{\beta} \alpha_i P_{id_{\min}} , \quad (20)$$

где $P_{id_{\min}}$ – вероятность попадания id_{\min} импульсов СИП на базовое время кода; α_i – значение коэффициента ложного приема при попадании на базовое время кода id_{\min} импульсов СИП; $\beta \leq (K-1)n$.

В дальнейшем для простоты будем считать, что $P_{\text{л.пр.макс}} = P_{\text{л.пр.}}$, если нет дополнительных условий.

Так как при независимых ошибках, вызываемых СИП при любом значении ОСШ, вероятность большего числа импульсов помех всегда меньше вероятности меньшего числа импульсов помех (это же впрямую следует из формулы (14) в соответствии с законом Пуассона), то справедливо неравенство:

$$P_{\beta d_{\min}} < P_{(\beta-1)d_{\min}} < \dots \leq P_{d_{\min}} . \quad (21)$$

Учитывая неравенства (21), формула (20) с достаточной степенью точности может быть записана в виде:

$$P_{\text{л.пр.}} = \alpha P_{d_{\min}} (0 \leq \alpha \leq 1) . \quad (22)$$

В формуле (22) значение вероятности $P_{d_{\min}}$ вычисляется по формуле (14).

Таким образом, в соответствии с формулой (19) на основе анализа используемого в ИК кода всегда можно определить значение коэффициента α , по формуле (14) вычислить значение вероятности $P_{d_{\min}}$, а затем по формуле (22) определить максимальное значение вероятности ложного приема $P_{\text{л.пр.}}$.

Формула (22) справедлива для корректирующих кодов, обнаруживающих ошибки. В случаях, когда в ИК используются корректирующие коды, исправляющие или обнаруживающие и исправляющие ошибки, то вместо формулы (22) должна применяться формула вида:

$$P_{\text{л.пр.}} = \alpha P_{d_{\min} - s - e_{cr}} . \quad (23)$$

Формула (23) справедлива для ИК, в КС которых возможны ошибки только трансформации ($e_{cr}=0$), только стирания ($s=0$) или ошибки обоих типов.

Как видно, формула (23) носит более общий характер, а формула (22) — частный случай формулы (23) при $s = e_{cr} = 0$.

III. ВЕРОЯТНОСТЬ ЛОЖНОГО ПРИЕМА ПРИ КАСКАДНОМ КОДИРОВАНИИ

С целью повышения помехоустойчивости в ИК ответственных ИУС и ИИС используются многоуровневые коды и, соответственно, многоуровневые КДК. Как показывает анализ таких систем, число каскадов кодирования-декодирования может быть достаточно большим, но самыми распространенными являются системы, ИК которых содержат двух- или трехуровневые КДК. Тем не менее, оценим общий случай с числом $N_{\text{КДК}}$ каскадов кодирования. Если в каждом каскаде кодирования-декодирования используются различные каскадные корректирующие коды, то можно ввести в рассмотрение соответствующие номера каскадов вероятности ложного приема: $p_{\text{л.пр.1}}, p_{\text{л.пр.2}}, \dots, p_{\text{л.пр.}N_{\text{КДК}}}$.

Вероятность ложного приема для такого многоуровневого ИК можно определить по следующему выражению:

$$\begin{aligned} P_{\text{л.пр.}} = & p_{\text{л.пр.1}} (1 - p_{\text{л.пр.2}}) \dots (1 - p_{\text{л.пр.}N_{\text{КДК}}}) + \dots + \\ & + p_{\text{л.пр.}N_{\text{КДК}}} (1 - p_{\text{л.пр.1}}) \dots (1 - p_{\text{л.пр.}(N_{\text{КДК}})}) + \\ & + p_{\text{л.пр.1}} p_{\text{л.пр.2}} (1 - p_{\text{л.пр.3}}) \dots (1 - p_{\text{л.пр.}N_{\text{КДК}}}) + \dots + \\ & + (1 - p_{\text{л.пр.}(N_{\text{КДК}})}) (1 - p_{\text{л.пр.}N_{\text{КДК}}}) (1 - p_{\text{л.пр.1}}) \dots (1 - p_{\text{л.пр.}(N_{\text{КДК}})}) + \dots + \\ & + p_{\text{л.пр.1}} p_{\text{л.пр.2}} \dots (1 - p_{\text{л.пр.}N_{\text{КДК}}}) \end{aligned} \quad (24)$$

После преобразований формулы (24) и пренебрегая всеми произведениями вероятностей, начиная со второго порядка, можно получить упрощенное выражение для вероятности ложного приема:

$$P_{\text{л.пр.}} \cong \sum_{j=1}^{N_{\text{КДК}}} p_{\text{л.пр.}j} . \quad (25)$$

Часто на практике для повышения помехоустойчивости ИК, а также с целью унификации аппаратного и программного обеспечения КДК каскадов проектируют идентичными, использующими одни и те же корректирующие коды. Так, например, поступают в ИК с многоступенчатыми принципами избирания [22]. Если считать каскады ИК одинаковыми, то логично предположить, что выполняется соотношение:

$$p_{\text{л.пр.1}} = p_{\text{л.пр.2}} = \dots = p_{\text{л.пр.}N_{\text{КДК}}} = p_{\text{л.пр.0}}, \quad (26)$$

и тогда, учитывая равенство (26), формула (25) примет вид:

$$P_{\text{л.пр.}} = N_{\text{КДК}} p_{\text{л.пр.0}}. \quad (27)$$

Для рассматриваемого многокаскадного КДК можно получить формулы (28) и (29), аналогичные формулам (22) и (23), соответственно:

$$P_{\text{л.пр.}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{КДК}}} \alpha_i p_{d_{\min_i}}. \quad (28)$$

$$P_{\text{л.пр.}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{КДК}}} \alpha_i p_{d_{\min_i} - s_i - e_{cri}}. \quad (29)$$

При выполнении условия (26) формулы (28) и (29), соответственно, примут вид формул (30) и (31):

$$P_{\text{л.пр.}} = N_{\text{КДК}} \alpha p_{d_{\min}}. \quad (30)$$

$$P_{\text{л.пр.}} = N_{\text{КДК}} \alpha p_{d_{\min} - s - e_{cr}}. \quad (31)$$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ оценок помехоустойчивости ИК в условиях действия СИП дает возможность сформулировать следующие основные выводы.

1. Вероятностные показатели достоверности передачи могут быть рассчитаны при известных значениях интенсивности СИП для конкретных типов кодов.

2. В общем случае применение корректирующего кода с исправлением ошибок (трансформации, стирания, совместных) приводит к незначительному росту вероятности ложного приема из-за некоторого увеличения значений коэффициента α , однако общее значение вероятности ошибочного приема уменьшается из-за резкого снижения вероятности защитного отказа, в результате чего увеличивается вероятность правильного приема.

3. При многокаскадных структурах ИК целесообразно стремиться к унификации КДК с точки зрения применяемых кодов, алгоритмов и программно-аппаратного обеспечения КУ и ДКУ каскадов.

4. Отдельного исследования требуют вопросы влияния на помехоустойчивость ИК используемых сигнальных признаков кода, особенно при недвоичных кодовых алфавитах, использующих и не использующих нулевой сигнальный признак, а также позволяющих формировать параллельные каналы передачи информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юргенсон Р.И. Помехоустойчивость цифровых систем передачи телемеханической информации. – Л.: Энергия, 1971. – 250 с.
2. Bernard S. Digital Communications: Fundamentals and. – Prentice Hall, 2001. – 1079 p.
3. Viterbi, A.J., Omura J.K. Principles of digital communication and coding. – McGraw-Hill, 1979. – 584 p.
4. Зюко А.Г. [и др.]. Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь. 1986. – 304 с.
5. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Сов. радио, 1970. – 728 с.
6. Юргенсон Р.И. Синтез кодирующих и декодирующих устройств телемеханики дискретного действия. – Л.: Изд-во Ленингр. электротехн. ин-та им. В. И. Ульянова (Ленина), 1959. – 185 с.
7. Шварцман В.О., Емельянов Г.А. Теория передачи дискретной информации. – М.: Связь, 1979. – 424 с.
8. Зюко А.Г. [и др.]. Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь. 1986. – 304 с.
9. Светлов М.С. [и др.]. Повышение помехоустойчивости недвоичных информационных каналов с помехами большой интенсивности // Радиотехника. – 2017. – № 7. – С. 136-139.
10. Светлов М.С. [и др.]. Анализ и оценка помехоустойчивости информационного канала с кодеком на базе кодового сигнального признака // Радиотехника. – 2018. – № 9. – С. 27-31. – DOI: 10.18127/j00338486-201809-06.
11. Svetlov M.S. [et. al.]. Increasing of information reliability of digital communication channels under conditions of high intensity noise // Dynamics of systems, mechanisms and machines (Dynamics-2016): Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference. – Omsk, 2016. IEEE Catalog Number: CFP16RAB-CDR. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819025.
12. Svetlov M.S. [et. al.]. Algorithms of coding and decoding for code with code signal feature // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus-2017): Proc. 2017 IEEE Conference. – St. Petersburg, 2017. – P. 748-752. – DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910666.
13. Svetlov M.S. [et. al.]. Synthesis of the information channel with codec based on code signal feature // Information and Communication Technologies for Industry and Research (ICIT-2019): Proc. International Conference. – Saratov, 2019. – P. 199-214. – DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_18.
14. Svetlov M.S. Coding theory challenges: classic and modern // Проблемы управления, передачи и обработки информации: Сб. трудов VI Международной научной конференции, посвященной 85-летию Ю.А. Гагарина, СГТУ, декабрь 2018. – Саратов: ООО «Студия оперативной полиграфии «Лоди», 2019.– С. 54-68.
15. Svetlov M.S. [et. al.]. Noise immunity improvement of DVB-T2 digital data transmission systems // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus-2018): Proc. 2018 IEEE Conference. – St. Petersburg, 2018. – P. 1162-1166. – DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317297.
16. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. – М.: Изд-во иностр. Литературы, 1956. – 664 с.
17. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Сов. радио. –1966. – 660 с.
18. ГОСТ Р МЭК 870-5-1-95. Устройства и системы телемеханики. Часть 5. Протоколы передачи. – М.: ИПК Издательство стандартов, 995.
19. Львов А.А., Светлов М.С., Ульянина Ю.А. Оценка границ избыточности недвоичных кодов // Тр. XII Всерос. совещ. по проблемам управления ВСПУ-2014. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 9177-9187.
20. Svetlov M.S. [et. al.]. Information channel synthesis for remote test monitoring // Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2018): Proc. International Conference. – Saratov, 2018. – P. 101-104.
21. Svetlov I.M., L'vov A.A., Svetlov M.S., Ulyanina Yu.A. Modeling of communication channels for codes that do not contain zero signal sign // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 1. – Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 140-147.
22. Ulyanina Y., L'vov A., Dolinina O., Svetlov M. Synthesis of Models of Information Channels with Memory // Proc. 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016. – P. 39.

Регрессионные и корреляционные модели для принятия управленческих кадровых решений сложноструктурированной промышленной компанией

Лившиц Михаил Юрьевич
Теплоэнергетический факультет
Самарский государственный
технический университет
Самара, Россия
mikhaillivshits@gmail.com

Тупоносова Елена Павловна
Институт автоматики и
информационных технологий
Самарский государственный
технический университет
Самара, Россия
tuponosova.ep@samgtu.ru

Еремеева Алина Александровна
Теплоэнергетический факультет
Самарский государственный
технический университет
Самара, Россия
aler2002@yandex.ru

Аннотация. В работе решена задача построения степенных математических моделей в регрессионной мультипликативной форме и динамических моделей в форме передаточных функций, связывающих индикаторы эффективности работы ПАО «НК «Роснефть» с показателями кадрового обеспечения компании. В качестве выходного индикатора эффективности рассматривается объем добычи нефти и газового конденсата, а входами математических моделей является количество работников и отношение среднемесячной заработной платы в ПАО «НК «Роснефть» к средней заработной плате в России. Математические модели позволяют прогнозировать результаты принимаемых кадровых решений с приемлемой достоверностью.

Abstract. The paper solves the problem of constructing power-law mathematical models in the form of a regression multiplicative form and dynamic models in the form of transfer functions linking the performance indicators of OJSC «NK «Rosneft» with the indicators of the company's staffing. The volume of oil and gas condensate production is considered as an output indicator of efficiency, and the inputs of the mathematical models are the number of employees and the ratio of the average monthly salary in OJSC «NK «Rosneft» to the average salary in Russia. Mathematical models make it possible to predict the results of personnel decisions with acceptable reliability.

Ключевые слова: Математическая модель, нефтяная отрасль, степенная модель, динамическая модель, объем добычи нефти и газового конденсата, дифференциальные уравнения, передаточные функции.

Keywords: Mathematical model, oil industry, power model, dynamic model, volume of oil and gas condensate production, differential equations, transfer functions.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из ведущей отраслей экономики Российской Федерации является нефтяная и газовая промышленность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Крупнейшей нефтяной компанией и одним из лидеров российской нефтяной отрасли, осуществляющим геологоразведку, добычу, нефтепереработку и сбыт продукции, является публичное акционерное общество (ПАО) «НК «Роснефть» [1], в структуру которого входит большое количество дочерних обществ. В 2020 году количество работников в компании составляло около 350 000 человек. Персонал компании должен не только обеспечивать существующие потребности, но и закладывать основы ее перспективного развития.

Для успешного развития и повышения производственных показателей эффективности ПАО «НК «Роснефть» важное значение имеет управление кадровыми ресурсами отрасли. Эффективному решению этой задачи способствует применение системы поддержки принятия кадровых решений, использующей соответствующие математические модели для выработки и анализа перспектив этих решений.

II. РЕГРЕССИОННАЯ МУЛЬТИПЛИКАТИВНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

По результатам консолидированной финансовой отчетности ПАО «НК «Роснефть» [2] из многочисленных факторов оценки эффективности компании будем использовать объем добычи нефти и газового конденсата в ПАО «НК «Роснефть» (Y , млн.тонн) за период с 2006 по 2021 гг., а в качестве входных показателей используются показатели кадрового обеспечения ПАО НК «Роснефть»: x_1 – количество работников в ПАО «НК «Роснефть» (тыс.чел.) и x_2 – отношение среднемесячной заработной платы в ПАО «НК «Роснефть» к средней заработной плате в России.

Построим математическую модель в регрессионной степенной мультипликативной двухфакторной форме:

$$Y = Ax_1^\alpha x_2^\beta, \quad (1)$$

где α, β – функции эластичности (чувствительность), а A – масштабный коэффициент.

Идентификация коэффициентов α , β производится методом наименьших квадратов (МНК) [3–7] после их логарифмирования, линеаризующего исходный вид (1) в линейное регрессионное уравнение и логарифмирования исходных данных. Методом наименьших квадратов получены эластичности $\alpha = 0,943$, $\beta = 0,914$ и масштабный коэффициент $A = 0,522$. По модели (1), построенной в регрессионной степенной мультиплекативной двухфакторной форме, наибольшую факторную эластичность отражающую чувствительность объема добычи нефти и газового конденсата в ПАО «НК «Роснефть» Y имеет количество работников – x_1 .

Качество моделирования оценивается средней ошибкой аппроксимации, коэффициентом детерминации, скорректированным коэффициентом детерминации, F-критерием Фишера, значением t -статистики и критерием Дарбина-Уотсона.

Средняя ошибка аппроксимации

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_t - \bar{y}_t|}{y_t} \cdot 100\%, \quad (2)$$

показывает среднее отклонение расчетных значений зависимой переменной от фактических значений.

Здесь n -количество наблюдений, y_t – действительные значения, \bar{y}_t – расчётные модельные значения выходной переменной Y .

Уравнение регрессии удовлетворительно моделирует процесс, если значение $\bar{\varepsilon}$ не превышает 10–12% [3, 4]. Для полученной модели (1) средняя ошибка аппроксимации $\bar{\varepsilon} = 6,88\%$, поэтому модель (1) достаточно хорошо аппроксимирует исходные статистические данные.

Общее объяснительное свойство уравнения линейной регрессии оценивается коэффициентом детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(y_t - \bar{y}_t)^2}{\Sigma(y_t - \bar{y}_{cp})^2}, \quad (3)$$

R^2 , являющимся квадратом коэффициента множественной корреляции, где \bar{y}_{cp} – среднее значение выходной переменной Y . Можно выделить следующие критические значения коэффициента детерминации R^2 [5, 8–10]:

- При $R^2 = 0$ теоретическое (модельное) значение становится равно среднему значению выходной переменной, и связь между входной и выходной переменной отсутствует.
- При $R^2 < 0,3$ наблюдается слабая связь между действительным и расчетным значением.
- При коэффициенте детерминации $0,3 < R^2 < 0,7$ имеется уверенная связь между действительным и расчетным значением.
- При коэффициенте детерминации $R^2 > 0,7$ существует сильная связь между действительным и расчетным значением.
- При $R^2 = 1$ все наблюдаемые точки лежат на построенной теоретической (модельной) прямой и, следовательно, получаем функциональную зависимость.

Для математической модели (1) R^2 равен 0,927 и можно констатировать сильную связь между действительными значениями и расчётными.

Из-за использования в математической модели нескольких входных факторов, целесообразно судить об адекватности модели по скорректированному коэффициенту множественной детерминации [3]

$$\overline{R^2} = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} \cdot (1 - R^2), \quad (4)$$

который позволяет сравнивать модели с различным числом переменных.

Здесь n -количество наблюдений, p – число факторов в уравнении регрессии.

Расчетный скорректированный коэффициент множественной детерминации $\overline{R^2} = 0,916$, значение практически совпадает с R^2 , близко к единице, а значит, полученная модель хорошо согласуется с исходной статистикой.

Для определения статистической значимости всего уравнения регрессии определяется параметрический критерий Фишера F и сравнивается с табличным значением критических точек распределения Фишера [5, 6, 8]:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-p-1}{p}, \quad (5)$$

При уровне значимости $\alpha = 0,01$ табличное значение распределения Фишера $F_{\text{табл}} = 6,70096$, а рассчитанное значение для уравнения (1) критерия Фишера $F = 83,321$. Так как значение F намного больше табличного критического значения $F_{\text{табл}}$, нулевая гипотеза статистической незначимости уравнения регрессии (1) отклоняется. Следовательно, построенная математическая модель (1) с достоверность 99% соответствует исходным статистическим данным и ее можно использовать для прогнозирования.

Для оценки значимости парного коэффициента корреляции используется критерий Стьюдента (t -критерий) [5, 9]:

$$T = \frac{r_e \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_e^2}}, \quad (6)$$

Выдвигается нулевая гипотеза о случайной природе показателей, которая принимается или отвергается при сравнении расчетного значения T с максимально возможным значением критерия $T_{\text{крит}}$.

Расчетное значение $T = 2,012$ больше критического $T_{\text{крит.}} = 1,761$ при уровне значимости $\alpha = 0,1$. Таким образом, нулевая гипотеза отвергается и с достоверностью 0,9 можно утверждать о статистической значимости переменных.

Наличие сильной корреляционной зависимости между последовательными уровнями временного ряда в случайной регрессионной зависимостью компоненте выборки (автокорреляция остатков) свидетельствует о низком прогнозирующем качестве регрессионной модели. Для анализа автокорреляции первого порядка остатков временного ряда используется критерий Дарбина-Уотсона [3, 5]

$$DW = \frac{\sum(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})^2}{\sum(\varepsilon_t)^2}, \quad (7)$$

где ε_t – ошибка аппроксимации, ε_{t-1} – $(t-1)$ -я ошибка аппроксимации.

Расчетное значение для критерия Дарбина-Уотсона $DW = 0,937$, $0,982 < DW < 1,539$, находится между предельными критическими значениями (0,982 и 1,539). Так как расчетное значение находится в зоне неопределенности, поэтому нет достаточных доказательств, чтобы опровергнуть нулевую гипотезу теста Дарбина-Уотсона и таким образом существует проблема автокорреляции остатков.

Автокорреляция остатков может быть следствием следующих причин:

- Не учтен в модели достаточно существенный фактор, при этом его влияние отражается на величине отклонений [4, 5, 8], которые в этом случае показывают закономерность в изменении, связанную с изменением неучтенного фактора.
- В модели не учитывается несколько факторов, влияние каждого из которых в отдельности несущественно, но при совпадении изменений этих факторов по направлению и по фазе в отклонениях может возникнуть автокорреляция остатков.
- Автокорреляция остатков может появиться в случае, когда неправильно выбрана форма связи между входами и выходами.
- Неверно выбран порядок авторегрессионной модели.
- Вследствие специфичности внутренней структуры случайного компонента.

На рис. 1 представлены результаты моделирования объема добычи нефти и газового конденсата в ПАО «НК «Роснефть», где y_t – расчетные значения Y математической модели (1) в соответствующие моменты времени, а y_{t-} – исходные статистические данные.



Рис. 1. Результаты моделирования

На основании полученных результатов, можно констатировать, что степенная математическая модель (1) адекватна и может быть использована для дальнейшего краткосрочного и среднесрочного прогнозирования, а зависимость объема добычи нефти и газового конденсата от количества работников и соотношения среднемесячной заработной платы в ПАО «НК «Роснефть» к средней заработной плате в России с достоверностью 92,7% объясняется с помощью полученной модели.

При этом вследствие неопределенного уровня критерия Дарбина-Уотсона $DW = 0,937$ следует использовать модель (1) для прогноза на горизонте 3-5 лет, после чего проводить параметрическую идентификацию модели для обновления ее коэффициентов.

III. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАДРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПАНИИ

Синтез алгоритмов динамического управления кадровым ресурсом базируется на динамических моделях в форме дифференциальных уравнений или передаточных функций, связывающих показатели эффективности работы компании ПАО «НК «Роснефть» с показателями работы его кадрового обеспечения [2].

Некорректная задача структурно-параметрической идентификации таких моделей регуляризуется рядом соотношений для сужения области поиска параметров и структуры модели до компактной. Структуру модели ограничим областью неоднородных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для каждого j -го входа x_j , $j = 2$ не выше третьего порядка:

$$\sum_{i=0}^3 a_i \frac{d^i y}{dt^i} = \sum_{\alpha=0}^2 b_{\alpha} \frac{d^{\alpha} x_j}{dt^{\alpha}}, \frac{dy}{dt^0} = y; \frac{dx}{dt^0} = x. \quad (8)$$

Дифференциальному уравнению (8) соответствуют передаточная функция вида (9):

$$W(p) = \frac{\sum_{\alpha=0}^2 b_{\alpha} p^{\alpha}}{\sum_{i=0}^3 a_i p^i} \quad (9)$$

и импульсная переходная характеристика

$$g(t) = L^{-1}[W(p)], \quad (10)$$

которая в соответствии с принципом суперпозиции определяет выходную величину $y(t)$ интегралом свертки:

$$y(t) = \sum_{j=1}^4 \int_0^{\infty} g(t) x_j(t-\tau) d\tau, t \geq 0. \quad (11)$$

Непосредственное определение импульсной переходной характеристики $g(t)$ из интегрального уравнения (10) – некорректная непараметрическая задача.

Уравнение (11) с помощью автокорреляционных $r_{xx}(t)$ и взаимных корреляционных $r_{yx}(t)$ функций преобразуем в уравнение Винера-Хопфа:

$$r_{yx}(t) = \int_0^{\infty} g(t) r_{xx}(t-\tau) d\tau, t \geq 0 \quad (12)$$

решение которого относительно $g(t)$ с целью регуляризации отыскивается на достаточно широком, но счетном множестве, сведенных в таблицу большого круга типовых объектов [11]. Тогда уравнение (8) может быть преобразовано к эквивалентной форме:

$$\sum_{i=0}^3 a_i \frac{d^i r_{yx}(t)}{dt^i} = \sum_{\alpha=0}^2 b_{\alpha} \frac{d^{\alpha} r_{xx}(t)}{dt^{\alpha}} \quad (13)$$

На коэффициенты уравнений (8), (12) и (13), накладывается ограничение на коэффициенты $a_3 > 0$, $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $a_1 a_2 > a_3$, удовлетворяющее критерию устойчивости Раусса-Гурвица, причем коэффициенты a_i и b_{α} лежат в пределах $a_{i \min} \leq a_i \leq a_{i \max}$, $b_{\alpha \ min} \leq b_{\alpha} \leq b_{\alpha \ max}$, отражающих допустимую степень затухания переходного процесса с одной стороны и отсутствие тривиального совпадения $r_{yx}(t) = r_{xx}(t)$, свидетельствующего о безинерционности объекта управления с другой стороны. При этом задача регуляризуется, становится корректной, а значит устойчивой по входным данным [11–14].

Для построения динамической модели, определяются две автокорреляционные функции входов $r_{xx_1}^3(t)$ и $r_{xx_2}^3(t)$, которые представлены на рис. 2 и 4 соответственно.

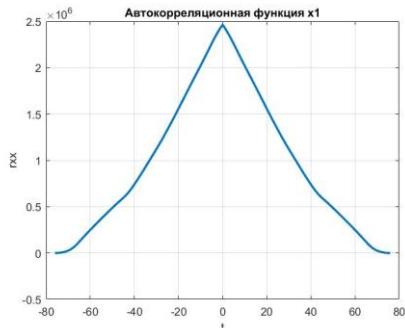


Рис. 2. Автокорреляционная функция $r_{xx_1}^3(t)$

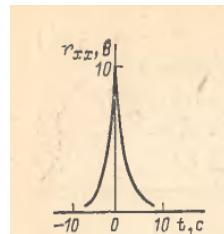


Рис. 3. Автокорреляционная функция $r_{xx_1}^T(t)$

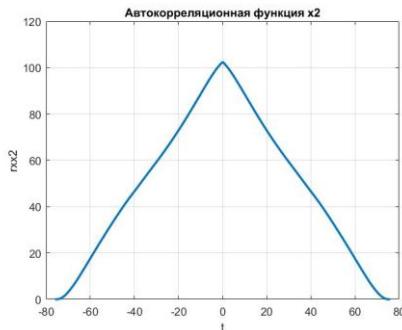


Рис. 4. Автокорреляционная функция $r_{xx_2}^3(t)$

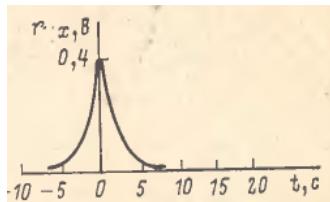


Рис. 5. Автокорреляционная функция $r_{xx_2}^T(t)$

По виду $r_{xx_1}^3(t)$ и $r_{xx_2}^3(t)$ подбирается наиболее близкая табличная автокорреляционная функция входа $r_{xx_1}^T(t)$ и $r_{xx_2}^T(t)$ из библиотеки типовых линейных моделей [11], которые представлены на рис. 3 и 5 соответственно.

Для сопоставления размерных значений экспериментальных $r_{xx}^3(t)$ и табличных $r_{xx}^T(t)$ автокорреляционных функций введены масштабные временные коэффициенты времени

$$k_{tx} = \frac{T_T}{T_3}, \quad (14)$$

где T_T и T_3 – отрезки оси времени на графиках кривых $r_{xx}^T(t)$ и $r_{xx}^3(t)$ соответственно от нуля до первого пересечения кривых с временной осью.

Для обеспечения временного соответствия экспериментальной $r_{xx}^3(t)$ и табличной $r_{xx}^T(t)$ автокорреляционной функций получаем $k_{tx_1} = 10$ и $k_{tx_2} = 17$.

На рис. 6 и 8 представлены экспериментальная взаимная корреляционная функция $r_{yx_1}^3(t)$ и $r_{yx_2}^3(t)$ и наиболее близкая к ней по форме взаимная табличная корреляционная функция $r_{yx_1}^T(t)$ на рис. 7 и $r_{yx_2}^T(t)$ на рис. 9.

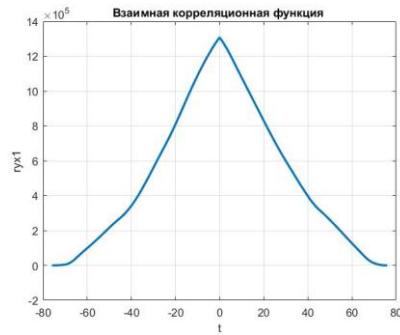


Рис. 6. Взаимная корреляционная функция $r_{yx_1}^3(t)$

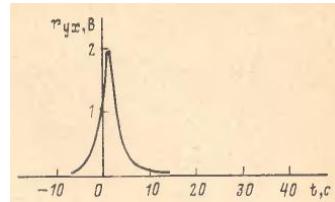


Рис. 7. Табличная взаимная корреляционная функция $r_{yx_1}^T(t)$

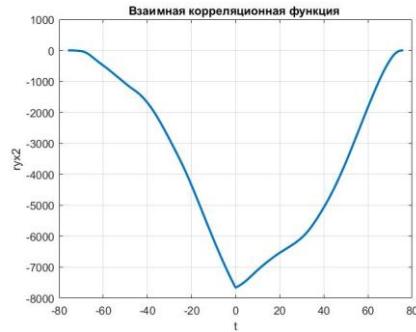


Рис. 8. Взаимнокорреляционная функция $r_{yx_2}^3(t)$

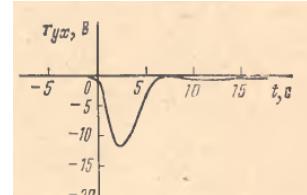


Рис. 9. Табличная взаимная корреляционная функция $r_{yx_2}^T(t)$

Учитывая коэффициент k_t (14) уточняется промежуточная взаимная корреляционная функция выходной и входной переменных $r_{yx}^{np}(t)$:

$$r_{yx}^{np}(t) = k_t \cdot r_{yx}^3\left(\frac{t}{k_t}\right). \quad (15)$$

Каждой взаимной табличной корреляционной функции соответствует дифференциальное уравнение, коэффициенты которого масштабируются. Масштабный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_{yx} = \frac{\max r_{yx}^{\text{пп}}(t) \cdot \max r_{xx}^T(t)}{\max r_{yx}^T(t) \cdot \max r_{xx}^3(t)}. \quad (16)$$

В рассматриваемом примере масштабный коэффициент: $k_{yx_1} = 2,26$ и $k_{yx_2} = 0,0007$.

В зависимости значений k_t и k_{yx} корректируем по формулам коэффициенты дифференциального уравнения (14) в зависимости от порядка объекта и находим соответствующую передаточную функцию.

Дифференциальное уравнение (13), связывающие динамику изменения объема добычи нефти и газового конденсата с показателями работы количества работников в ПАО «НК «Роснефть» с учетом коэффициента $k_{tx_1} = 10$ и масштабного коэффициента $k_{yx_1} = 2,26$ примет вид:

$$r'_{yx_1}(t) + 10r_{yx_1}(t) = 5,3r_{xx_1}, \quad (17)$$

и соответствующая передаточная функция будет иметь вид:

$$W_{yx_1}(p) = \frac{5,3}{p+10} = \frac{0,53}{0,1p+1}. \quad (18)$$

Дифференциальное уравнение, связывающее корреляционные функции $r_{yx_2}(t)$ и $r_{xx_2}(t)$ с коэффициентами $k_{tx_2} = 17$ и $k_{yx_2} = 0,0007$ в итоге имеет вид:

$$r''_{yx_2}(t) + 17r'_{yx_2}(t) + 289r_{yx_2} = 0,0014r'_{xx_2} - 0,012r_{xx_2} \quad (19)$$

и соответствующая передаточная функция $W_{yx_2}(p)$ будет иметь вид:

$$W_{yx_2}(p) = \frac{0,0014p - 0,012}{p^2 + 17p + 289} = \frac{0,0000048p - 0,000042}{0,0035p^2 + 0,059p + 1}. \quad (20)$$

Динамическая модель кадрового обеспечения компании представляет собой суперпозицию реакции двух входных воздействий. Сопоставление результатов моделирования динамических моделей с динамикой статистических результатов работы компании ПАО «НК «Роснефть» на рис. 10 демонстрирует хорошую сходимость результатов моделирования динамических моделей с реальными данными. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,91$.

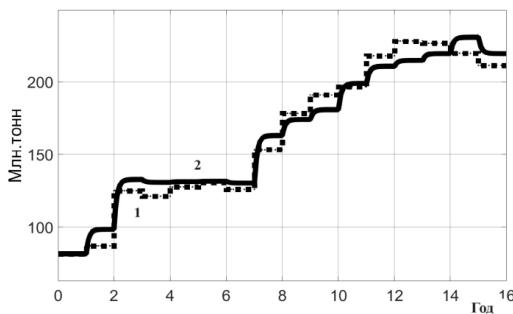


Рис 10. Результаты моделирования

На рис. 10 график 1 – исходные статистические данные, а график 2 – результаты динамического моделирования в пакете MATLAB.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены два вида математических моделей, отражающих связь эффективности работы ПАО НК «Роснефть» с кадровым обеспечением. Степенные математические модели предназначены для уточненных расчетов эффективности кадрового обеспечения ПАО НК «Роснефть», а динамические математические модели, несмотря на меньшую точность из-за соответствующих допущений при их синтезе, пригодны для динамического управления кадровым ресурсом компании в системе поддержки принятия кадровых решений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.rosneft.ru/about/> ПАО НК «Роснефть».
2. https://www.rosneft.ru/Investors/statements_and_presentations/Statements/ Консолидированная финансовая отчетность ПАО «НК «Роснефть» по международным стандартам.
3. Доугерти К. Введение в эконометрику : учебник для экон. спец. вузов: пер. с англ. – М.: ИНФРА-М, 1999. – 402 с. (Сер. "Университетский учебник").
4. Суханова Е.И., Ширяева Л.К. Начальный курс эконометрики: Руководство к решению задач: учеб. пособие / допущено Учебно-методическим объединением по образованию в области статистики и антикризисного управления в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Статистика» и другим экономическим специальностям. – Самара: Изд-во Самар. гос. экон. ун-та, 2006. – 192 с.
5. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2005. – 126 с.
6. Гумранов Б.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для среднего профессионального образования. – 12-е изд. – М.: Изд-во «Юрайт», 2024. – 479 с.
7. Яковлев В.Б. Статистика. Расчеты в Microsoft Excel: учебное пособие для среднего профессионального образования. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2024. – 353 с.
8. Тупоносова Е.П. Управление кадровым обеспечением регионального производственного комплекса "вуз – нефтяной кластер": дисс. ... канд. техн. наук. – 2023. – 208 с.
9. Замков О.О., Толстопятенко А.В., Черемных Ю.Н. Математические методы в экономике. – М.: МГУ, изд-во «Дело и сервис», 1999. – 368 с.
10. Гаврилова А.А., Голованов П.А., Дилигенский Н.В., Тупоносова Е.П. Конструирование моделей и построение краткосрочного перспективного прогноза выпуска специалистов // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – Июнь 2011. – № 2 (30). – Самара. – С. 21-29.
11. Анисимов С.А., Зайцева И.С., Райбман Н.С., Яралов А.А. Типовые линейные модели объектов управления / под. ред. Райбмана Н.С. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
12. Голованов П.А., Лившиц М.Ю., Тупоносова Е.П. Динамическое моделирование и управление кадровым обеспечением регионального производства // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2023. – Т. 1. – С. 196-199.
13. Тупоносова Е.П. Управление кадровым обеспечением регионального производственного комплекса «вуз – нефтяной кластер» // Математические методы в технологиях и технике. – СПб., 2023. – № 9. – С. 110-118. – DOI: 10.52348/2712-8873_MMTC_2023_9_112.
14. Голованов П.А., Лившиц М.Ю., Тупоносова Е.П. Идентификация модели подготовки кадров для нефтяного кластера Самарской области как объекта управления // Математические методы в технологиях и технике.. – СПб., 2022. – № 2. – С. 24-31.

Влияние желаемой производительности на выбор режима периодической эксплуатации

Соловьев Илья Георгиевич
Институт геологии
и нефтегазодобычи
Тюменский индустриальный
университет
Тюмень, Россия
`igsolovyev123@gmail.com`

Баландин Максим Сергеевич
Институт геологии
и нефтегазодобычи
Тюменский индустриальный
университет
Тюмень, Россия
`diekmaer@yandex.ru`

Говорков Денис Александрович
Институт геологии
и нефтегазодобычи
Тюменский индустриальный
университет
Тюмень, Россия
`dagovorkov@mail.ru`

Аннотация. Растущий фонд стареющих месторождений с явно выраженной динамикой падения подпора пласта и роста обводнённости скважин, перспектива перехода на разработку сложно извлекаемых запасов, с неизбежностью ставят вопросы о введении регулируемых технологий отбора нефти с контролем факторов ресурсно-энергетических режимов эксплуатации глубинно-насосного оборудования. Переход на технологии «мягких пусков» расширяет перспективы введения регламента регулируемой периодической эксплуатации для скважин обустроенных ЭЦН-ми. В представленной работе исследуются вопросы оптимизации пуско-остановочных режимов эксплуатации скважин для априорно заданных уровней средней производительности.

Abstract. The growing stock of aging fields with a clearly expressed dynamics of falling reservoir pressure and increasing water cut in wells, the prospect of switching to the development of difficult-to-recover reserves, inevitably raises questions about the introduction of controlled oil extraction technologies with control over the factors of resource and energy operating modes of deep-well pumping equipment. The transition to “soft start-up” technologies expands the prospects for introducing regulations for controlled periodic operation for wells equipped with ESPs. The presented work examines the optimization of start-up and shutdown modes of well operation for a priori specified levels of average productivity.

Ключевые слова: периодическая эксплуатация, скважина, ЭЦН, срыв подачи, давление отключения, давление повторного включения, оптимальный режим, средняя производительность, ресурсный потенциал, алгоритм управления.

Keywords: Periodic operation, well, ESP, supply failure, shutdown pressure, restart pressure, optimal mode, average productivity, resource potential, control algorithm.

I. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение доли скважин, периодического фонда [1], требует более грамотного подхода к управлению параметрами и режимами эксплуатации таких систем. Добыча в таком режиме состоит из двух полупериодов: ΔT_0 – полупериод накопления пластовой жидкости в стволе скважины и ΔT_1 – полупериод откачки скважинной жидкости погружным ЭЦН-ом.

Необходимость регулировки (сокращения) отборов в условиях падения подпора пласта связана с упреждением возможного выхода скважинной системы в предаварийное состояние срыва подачи (СП) [2]. Это вызвано критическим снижением динамического уровня над

приёмом насоса или избытком свободного газа у первой ступени. И та, и другая ситуации надёжно отслеживается по адекватному снижению давления у приема насоса, [МПа]:

$$p(3, t) \in [p_F, p_S], \quad (1)$$

где p_F – давление отключения ЭЦН ($u(t_F)=0$), упреждающий выход системы за границу функциональной устойчивости по СП ($p(3)^{LM} < p_F$), p_S – уровень повторного запуска ($u(t_S)=1$), лежащий ниже равновесного состояния остановленной не фонтанирующей скважины ($p^0(3) < p_S$).

Алгоритм управления в условиях (1) принимает вид:

$$u(t+) = \begin{cases} 0, & p(3, t) < p_F \\ u(t), & p(3, t) \in [p_F, p_S] \\ 1, & p(3, t) > p_S \end{cases}. \quad (2)$$

Типовые графики вариации давлений у приёма насоса $p(3, t)$ одного пуско-остановочного цикла для четырех уставок $\langle p_F, p_S \rangle$ алгоритма (2), воспроизведенные по-средством моделирования комплексной гидродинамической модели скважины [3, 4] с параметрами из табл. 1 и 2, (см. ниже) представлены на рис. 1.

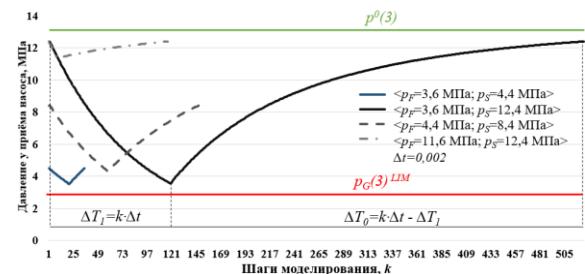


Рис. 1. Вариация давления $p(3, t)$ пуско-остановочного цикла для четырёх уставок алгоритма (2)

На рис. 2 изображена функциональная схема скважины с ЭЦН-ом, приведенная к вертикали, где введены обозначения режимных (переменных) состояний и параметров системы в ключевых точках подъёмника.

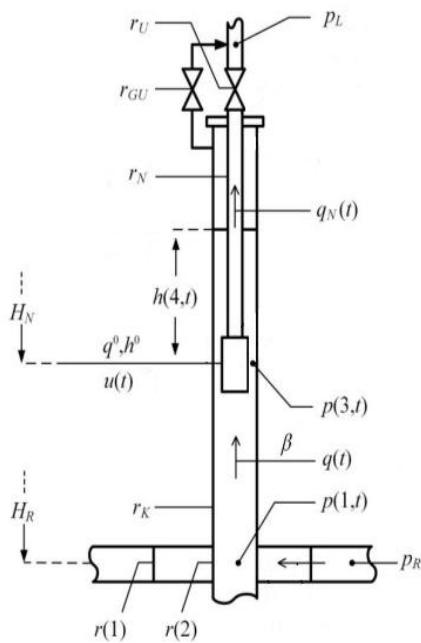


Рис. 2. Функциональная схема скважины с погружным электронасосом, приведенная к вертикали (пояснение в тексте)

Это r_U , r_{GU} , r_N , r_K – гидросопротивления сегментов подъемника, [сут/м²], $r(1)$, $r(2)$ – гидросопротивления притока, [МПа·сут/м³], p_R , $p(1,t)$, $p(3,t)$, p_L – распределение давлений от пласта, приёма до устья, [МПа], $q(t), q_N(t)$ – приток и подача насоса, [м³/сут], $h(4,t)$ – уровень жидкости над приёмом насоса, [м].

Более полное описание комплексной термобарической модели гидродинамики скважины изложено в [3, 4, 6].

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры скважины

Наименование, [ед. изм.]	Обозначение	Значение
Глубина забоя, [м]	H_R	2000
Глубина подвески, [м]	H_N	1700
Обводненность, [ед.]	β	0,4
Пластовое давление, [МПа]	p_R	15,5
Давление у приёма остановленной скважины, [МПа]	$p_{(3)}$	12,9
Давление у приёма по нижней границе функциональной устойчивости, [МПа]	$p(3)^{LM}$	3,1
Потенциал скважины по притоку	q_β	60,1
Подача насосного агрегата	q^0	80
Напор насосного агрегата	h^0	2463
Шаг по давлению, [МПа]	Δp	0,8

ТАБЛИЦА 2. Настроочные коэффициенты

a_{T1}	a_h	c_{12}	c_3
$0,15 \cdot 10^{-3}$	12,5	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$
δH_1	δH_2	$\delta \theta_1$	$\delta \theta_2$
0,5	0,8	0,4	0,55
a_1	a_2	$a_{12}=a_{22}$	θ_{p+}
1	3	1,5	200

Чаще всего периодический режим применяют для малых и средне дебитных скважин ($q_N(t) \leq 50 \text{ м}^3/\text{сут}$) с обводненностью $\beta(t) < 0,9$ и малым содержанием механических примесей [7]. Эксплуатация подобных скважин в непрерывном режиме подразумевает применение малодебитного оборудования с заниженными ресурсно-энергетическими показателями. Кроме того, скважины непрерывного фонда типового исполнения (без дорогостоящего частотного привода) не позволяют оперативно менять процент отбора жидкости без замены оборудования. В случае периодической эксплуатации, снижение подачи пропорционально падению пластового давления легко реализуется регулировкой уставок $\langle p_F, p_S \rangle$ алгоритма (2).

Несмотря на использование схем «мягких пусков» [8] при каждом повторном запуске происходит скачкообразное увеличение пусковых токов и силовых нагрузок на механические узлы системы, что ускоряет механический износ и в сочетании с перегревами, ускоряет старению изоляции, увеличивая тем самым риски преждевременных отказов. Поэтому, при выборе параметров режима периодической эксплуатации важно оценивать и регулировать ресурсно-энергетические потенциал системы в целом.

II. ФОРМАЛИЗАЦИЯ

Вводится функциональный показатель ресурсно-энергетической эффективности режима работы скважины

$$J(\mathbf{x}) = \int_0^T (c_1(1 - \beta)q_N(t) - c_2q_N(t) - c_3P_1(t))dt, \quad (3)$$

отражающий основную долю прибыли, доставляемой скважиной на полном жизненном цикле T , [сут] эксплуатации силовой установки и показатель средней производительности q_0

$$q_0 = \frac{1}{T} \int_0^T q_N(t)dt. \quad (4)$$

Здесь $q_N(t)$ – кривая динамики циклической подачи нефти обводненностью β с ценой продажи c_1 (доходная часть критерия прибыли), $P_1(t)$ – график мощности потребления ЭЦН, [МПа·м³/сут], c_2 и c_3 – расценки на эксплуатационные и выделенные энергетические затраты на добычу (расходная часть).

В условиях (3) задача оптимизации параметров и режимов эксплуатации скважины периодического фонда может быть поставлена как экстремальная вида

$$\mathbf{x}_* = \arg \max J(\mathbf{x}), \quad (5)$$

при заданном уровне средней производительности q_0 .

В сокращенной схеме $\mathbf{x} = [p_F \ p_S]^T$ – искомые уставки алгоритма (2). В более полной постановке $\mathbf{x} = [H_N \ q^0 \ p_F \ p_S]^T$, где H_N – глубина подвески, [м], q^0 – номинал производительности выбранного типоразмера насоса. Ниже рассматривается сокращенная схема.

Оценка периода наработки по условию [9]

$$T = \arg \{E^0 = E(t)\} \quad (6)$$

базируется на определении модели динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН

$$E(t) = \int_0^t (\gamma q_N(t) h_N(t) + \gamma q^0 h^0 \left(a_1 u(t) e_1(H_N) + a_2 e_2(\theta_p(t)) \right) dt + (n(t) - n^0)_+ \gamma q^0 h^0 \delta T, \quad (7)$$

которая помимо производственных затрат ресурса (первое подынтегральное слагаемое), равных работе насоса по перекачке жидкости с удельным весом γ , [МПа/м], дополнена непроизводственными затратами [10], отражающими относительную долю сокращения потенциала наработки по факторам заглубления

$$e_1(H_N) = u(t) \left[\left(\frac{H_N}{H_R} - \delta H_1 \right)_+ + a_{12} \left(\frac{H_N}{H_R} - \delta H_2 \right)_+ \right],$$

перегрева

$$e_2(t) = \left(\frac{\theta_p(t)}{\theta_{p+}} - \delta \theta_1 \right)_+ + a_{22} \left(\frac{\theta_p(t)}{\theta_{p+}} - \delta \theta_2 \right)_+,$$

повторных пусков $\delta T(n(t) - n^0)_+$, когда каждый повторный пуск, превышающий норматив n^0 , сокращает потенциал наработки на δT , а $n(t)$ – число осуществленных повторных пусков к моменту времени t . Здесь $h_N(t)$ – динамика напора насоса в режиме пуска, [м], H_R – глубина забоя по вертикали, [м], δH_1 , δH_2 – факторы кривизны ствола, $\theta_p(t)$ – температура нагрева ЭЦН [5], [°C], $\delta \theta_1$, $\delta \theta_2$ и θ_{p+} – параметрические настройки теплофизической устойчивости изоляции силовой установки, a_1 , a_2 , a_{12} , a_{22} – коэффициенты чувствительности ресурса к факторам.

Ресурсный потенциал нового изделия $E^0 = \gamma_w q^0 h^0 T^0$, как и в [9,10], оценивается расчётным количеством полезной работы, производимой насосом в комфортно-номинальных условиях эксплуатации при перекачке воды с удельным весом γ_w на полном жизненном цикле T^0 .

В условиях снижения подпора пласта и роста обводнённости притока, решение о переобустройстве скважин на ЭЦН с малой подачей, например, $q^0 \leq q_m^0$ при сохранении сравнительно высоких напоров и желаемого режима непрерывной эксплуатации должно учитывать факторы снижения ресурсно-энергетической эффективности маломощных ЭЦН. В этой связи:

- Снижение КПД ЭЦН с выбором номинала подачи q^0 ниже q_m^0 учитывается введением настраиваемого мультиплексора $\eta_P(q^0) = \eta_P^0 \nu_\eta(q^0)$. Например, при номинале КПД $\eta_P^0 \approx 0,5$ и $q_m^0 \approx 80$ понижающий мультиплексор аппроксимируется соотношением вида:

$$\nu_\eta(q^0) = (q^0 + 120 - (q^0 - 80)_+)/200. \quad (7)$$

- В предположении равной долговечности T_0 всех типоразмеров ступеней одного производителя, возможный рост риска отказа с увеличением числа ступеней и секций, учитывается кусочно-линейной корреляцией вида:

$$T^0 = T_0 - a_{T1}(h^0 - h_T(q^0))_+,$$

по превышению расчётного номинала напора h^0 нормативного уровня $h_T(q^0)$, который для малых типоразмеров с относительным увеличением числа ступеней снижается. Так, для $q_m^0 \approx 80$ в расчётном примере используется

$$T^0 = T_0 - 0,15 \cdot 10^{-3} (h^0 - h_T(q^0))_+, \\ h_1(q^0) = a_h(q^0 - (q^0 - 80)_+). \quad (8)$$

III. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

В режиме стационарных циклов с полупериодами работы ΔT_1 и останова ΔT_0 расчет времени наработки $T = \tilde{n} \Delta T$, где $\Delta T = \Delta T_0 + \Delta T_1$ период целого цикла сводится, согласно (6, 7), к оценке числа повторных пусков по выражению:

$$\tilde{n} = \begin{cases} \frac{T_\gamma^0}{\Delta E_0 + a_1 \Delta E_1 a_2 \Delta E_2}, & \text{если } \tilde{n} \leq n_0, \\ \frac{T_\gamma^0 + n^0 \delta T}{\Delta E_0 + a_1 \Delta E_1 a_2 \Delta E_2 + \delta T}, & \text{если } \tilde{n} > n_0, \end{cases} \quad (9)$$

в котором

$$\Delta E_0 = \int_0^{\Delta T_1} \frac{q_N(t) h_N(t)}{q^0 h^0} dt, \quad \Delta E_1 = e_1(H_N) \Delta T_1, \\ \Delta E_2 = \int_0^{\Delta T_1} e_2(\theta_p(t)) dt, \quad T_\gamma^0 = T^0 \frac{\gamma_w}{\gamma},$$

где целая часть \tilde{n} и есть, согласно (9), количество повторных пусков $n(T)$ на полном периоде наработки. Расчёт целевого показателя (3) в условиях стационарных циклов также упрощается:

$$J = \tilde{n} (c_{12} \Delta Q_N - c_3 \Delta P_1), \quad q^0 = \frac{\Delta Q_N}{\Delta T}. \quad (10)$$

Здесь $\Delta P_1 = \int_0^{\Delta T_1} (P_1(t) - N_2(t)) dt$ – энергетические потери цикла, идущие на нагрев ЭЦН, $\Delta Q_N = \int_0^{\Delta T_1} q_N(t) dt$ – объем добычи за один цикл, $P_1(t)$ – график мощности потребления ЭЦН-ом, $N_2(t) = \gamma q_N(t) h_N(t)$ – график работы, совершаемый насосом по перекачке жидкости с удельным весом γ с расходом $q_N(t)$ и напором $h_N(t)$, а $c_{12} = (1 - \beta) c_1 - c_2$. Блок схема алгоритма вычислительного анализа по восстановлению линий уровня критерия $J(j, l)$ и средних расходов $q_0(j, l)$ (10) на дискретном множестве пар $\langle p_F, p_S \rangle$, принадлежащих узлам треугольной сетки (рис. 3) координат настроек алгоритма (2), приведена на рис. 4.

$$\begin{cases} p_F(l) = p(3)^{LIM} + l \Delta p, & l \in \{1, 2, \dots, L-1\}, \\ p_S(j) = p(3)^{LIM} + j \Delta p, & j \in \{l+1, \dots, L\}. \end{cases} \quad (11)$$

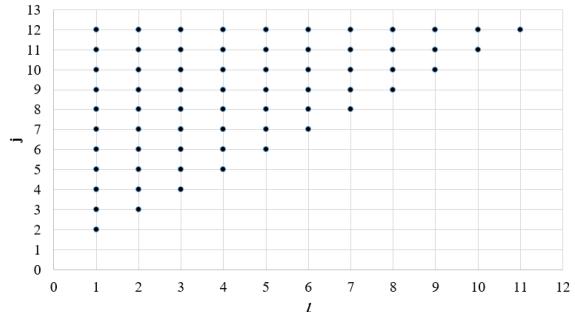


Рис. 3. Координаты пар настроек алгоритма (2) из треугольной области допустимых решений

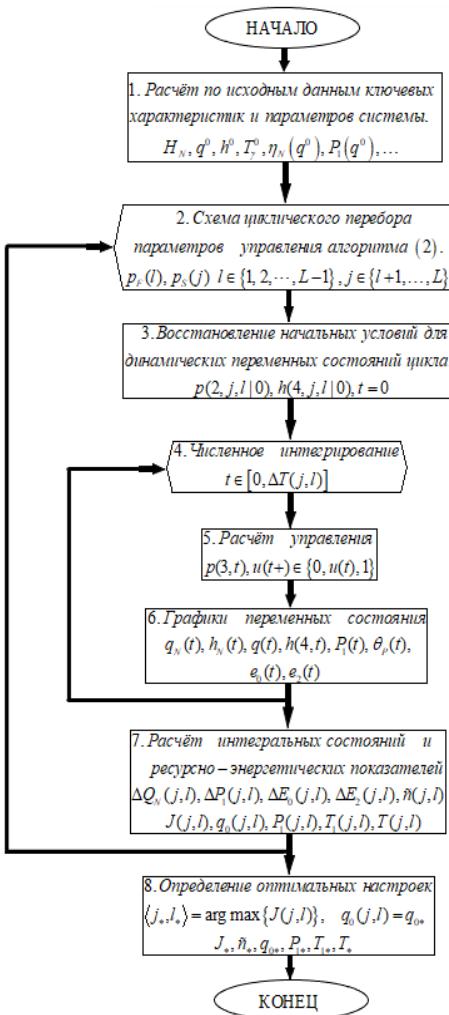


Рис. 4. Блок-схема вычислительного анализа работы скважины по определению оптимальных (3) настроек алгоритма периодической эксплуатации (2)

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты вычислительного анализа для скважины с параметрами из табл. 1, 2 представлены на рис. 5, где отображена топология линий уровня критериев J и среднене-циклических подач $q_0(10)$ на дискретном поле допустимых настроек (11) алгоритма (2), позволяют установить важные свойства исследуемых режимов.

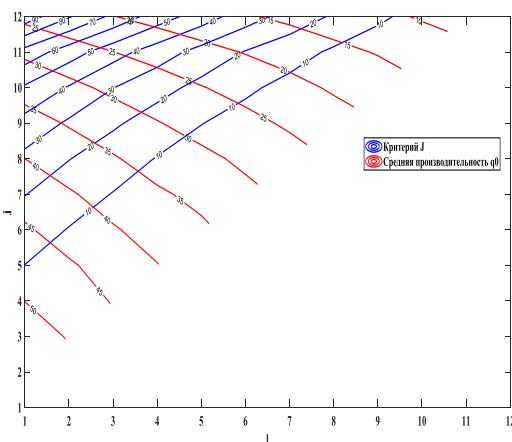


Рис. 5. Линии равных значений критерия J и средней производительности q^0

Для этого следуя топологии роста средней производительности q_0 и критерия J в табл. 3 вынесены интегральные состояния системы, соответствующие перебору настроек p_F и p_S алгоритма (2), где показатель J для фиксированных значений средних производительностей q_0 достигает максимальных значений. Соответствующие графики приведены на рис. 6.

ТАБЛИЦА 3. Ключевые показатели

№ точки, i	$\langle l; j \rangle$	J	q_0	T	T_1	\bar{n}
1	$\langle 10; 12 \rangle$	6,43	10	214,88	17,69	632
2	$\langle 6; 12 \rangle$	34,53	15	371,61	50,87	553
3	$\langle 3; 12 \rangle$	67,63	20	432,45	79,87	487
4	$\langle 1; 12 \rangle$	95,84	25	449,96	101,72	431
5	$\langle 1; 11 \rangle$	66,21	30	348,88	97,01	445
6	$\langle 1; 9 \rangle$	36,75	35	244,07	87,03	473
7	$\langle 1; 8 \rangle$	27,43	40	207,88	81,01	488
8	$\langle 1; 6 \rangle$	14,59	45	150,05	67,73	521
9	$\langle 1; 4 \rangle$	6,02	50	98,14	49,63	564
10	$\langle 1; 2 \rangle$	1,09	55	43,68	24,96	624

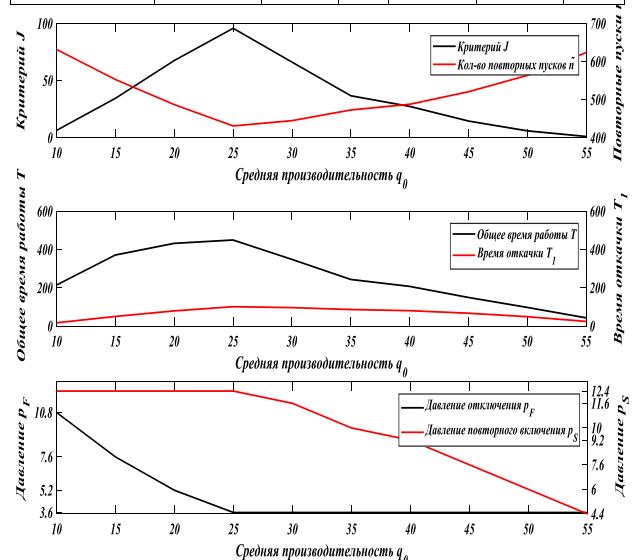


Рис. 6. Показатели ресурсно-энергетической эффективности работы системы для заданных средних расходов

Анализ графики и полученных табличных данных позволяет сделать следующие выводы:

- Режим управления с максимальным уровнем прибыли $J(4)=95,84$ и самым длительным периодом наработки $T(4)=449,96$ даёт средний уровень производительности $q_0(4)=25$ при потенциале $q_B=60,1$. Отношение полупериода работы ΔT_1 к полному периоду цикла ΔT равняется 0,22, то есть скважина на полном периоде эксплуатации 78 % времени находится в остановленном состоянии.
- Альтернативный режим с максимально допустимой средней производительностью $q_0(10)=55$ имеет самый короткий период наработки $T(10)=43,68$ и самую низкую прибыль

- $J(10)=1,09$. Основная доля ресурсного потенциала расходуется на реализацию частых повторных пусков $\tilde{n}(10)=624$.
- При постановке задачи с предписанием средней производительностью сразу несколько режимов управления могут обеспечить требуемую среднюю производительность q_0 , однако по показателю прибыли J предпочтительным будет режим с минимальным давлением отключения $p_F(l)=3,6 \text{ MPa}$, при $q_0 \in [25, 55]$ и максимальным уровнем повторных пусков $p_S(j)=12,4 \text{ MPa}$ при $q_0 \in [10, 25]$.
 - В принятых предположениях задача двупараметрической оптимизации по определению уставок остановов и повторных пусков $x=[p_F, p_S]^T$ режима эксплуатации по критерию прибыли (3) для предписанных средне-циклических расходов из области допустимых значений, по факту сводится к двум одно-параметрической, с определением только уставки повторных пусков для $q_0 \in [25, 55]$ и остановов для $q_0 \in [10, 25]$, обеспечивающих заданную среднюю производительность q_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей совершенствования систем электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 9. – С. 203-215. – DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4351.
2. Мищенко И.Т. Расчеты при добыче нефти и газа. – М.: Изд-во «НЕФТЬ и ГАЗ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2008. – 296 с., ил.
3. Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Белащевский С.С., Веденникова Ю.А. Модель переходных процессов в скважине с частотно-регулируемым электроцентробежным насосом // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 1. – С. 110-120. – DOI: 10.18799/24131830/2019/1/55.
4. Соловьев И.Г., Белащевский С.С. Операционная модель динамики сорбции и растворения солей осложнённого фонда скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 3. – С. 35-41.
5. Уразаков К.Р., Рукин М.В., Борисов А.О. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 4. – С. 62-71. – DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959.
6. Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Оптимизация параметров обустройства и режима эксплуатации скважины с ЭЦН в условиях осложнений // НТЖ «Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности». – 2019. – № 9. – С. 28-35. – DOI: 10.33285/0132-2222-2019-9(554)-28-35.
7. Лихачева Е.А., Островский В.Г., Лыкова Н.А. [и др]. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации // PROнефть. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 54-58. – DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58.
8. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Деговцов А.В. [и др]. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 4. – С. 25-30.
9. Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Ресурсно-энергетическая эффективность обустройства скважин с частотно регулируемой подачей насоса // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021 – Т. 332, № 6. – С. 60-72. – DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3236.
10. Veselov G.E., Sklyarov A.A. Nonlinear Control System of Mobile Robot for Avoiding Obstacles // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019, St. Petersburg, 30.10.2019. – St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 281-284. – DOI: 10.1109/CTS48763.2019.8973252.
11. Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Константинов И.В. Факторная модель динамики освоения эксплуатационного ресурса ЭЦН и правила её сопровождения // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 9 1. – С. 110-120. DOI: 10.18799/24131830/2019/1/55.

Синергетический синтез алгоритмов управления движением автомобиля

Олейников Константин Анатольевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
koleynikov@sedu.ru

Аннотация. В статье продемонстрирован синтез алгоритма управления движением автомобиля с использованием синергетического подхода. Рассматривается математическая модель поперечного движения автомобиля,дается ее обоснование, приводятся результаты ее компьютерного моделирования. С помощью синергетического подхода и метода АКАР приведен синтез регулятора поддержания скорости движения автомобиля полной нелинейной модели и представлены результаты компьютерного моделирования и синтеза синергетического закона управления.

Abstract. The paper demonstrates the synthesis of a vehicle motion control algorithm using a synergetic approach. A mathematical model of the lateral movement of a car is considered, its justification is given, and the results of its computer modeling are presented. Using the synergetic approach and the AKAR method, the synthesis of a vehicle speed control regulator of a complete nonlinear model is presented and the results of computer modeling and synthesis of the synergetic law of control.

Ключевые слова: автомобиль, динамика движения, нелинейные системы, синергетическая теория управления, метод АКАР, инвариант.

Keywords: vehicle, motion dynamics, nonlinear systems, synergetic control theory, ADAR method, invariant.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всём мире ведутся активные исследования, направленные на создание систем безопасности движения автомобиля как автоматических в режиме автопилотирования, так и систем помощи водителю, в которых благодаря интеллектуальным алгоритмам и законам управления обеспечивается стабилизация движения транспортного средства, особенно в экстремальных условиях при сильных возмущениях при резких поворотах и на сложных типах поверхности типа дождя, снега, снега.

В данной статье рассматриваются существующие системы стабилизации курсового движения автомобиля,дается их характеристика, приводится описание математических моделей движения, на основе которых строятся подобные системы стабилизации, описывается процедура синтеза синергетического регулятора с учетом проскальзывания колеса для стабилизации на различных типах поверхности. Использования синергетического

подхода при синтезе систем управления является достаточно новым и перспективным научным направлением, при которых используется нелинейная математическая модель объекта управления без упрощений и линеаризации, при котором получаются асимптотически устойчивые регуляторы, гарантирующие выполнение управлений задач, таких как стабилизация величины, слежение, минимизация характеристики (например, энергопотребления) за счет использования в процессе синтеза специальных целевых функций – инвариантов [1–3].

II. СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ

Системы стабилизации движения транспортных средств получили свое развитие более полувека назад. Еще одни из первых танков Второй Мировой войны получали систему распределения крутящего момента, позволяющие транспортному средству менять крутящий момент, приложенный к гусеницам, вызывая торможение соответствующего выходного вала дифференциала. Это вызывало снижение крутящего момента на гусенице, и разница этого момента на гусеницах создавало поворотный момент рысканья. Это стало предпосылкой появления векторных систем управления распределения момента (TV) [4].

В дальнейшем наибольшую известность приобрели системы антиблокировочной системы (ABS), системы контроля тяги (TCS), и системы курсовой устойчивости (ESP). ABS стала первой активной системой безопасности движения, ставшей стандартом для современных автомобилей, и позволяет уменьшать тормозной момент при блокировании колес вследствие резкого торможения. TCS является дополнительным средством безопасности к ABS и работает в обратном направлении, снижает крутящий момент двигателя при обнаружении пробуксовки колес и не дает ведущим колесам автомобиля буксовать при начале движения, резком ускорении, поворотах, плохих дорожных условиях и быстром перестроении. ESP это система контроля рыскания автомобиля, которая улучшает поведение автомобиля, ускоряя и тормозя колесами для стабилизации курсового движения автомобиля. TV системы являются продолжением ESP систем, содержащих ряд улучшений в виде векторного распределения момента для большей и точной стабилизации движения [5, 6].

Все эти технологии управляются электронной системой безопасности (ESC) внутри автомобиля. В качестве входных данных в систему приходят показания датчиков, как скорость колес в различных направлениях и контроллер управления определяет требуемую тягу и подачу топлива-ускорения или торможения для того, чтобы обеспечить устойчивое движение автомобиля.

III. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОМОБИЛЯ

A. Математическая модель движения автомобиля

Согласно поставленной задаче будет рассматриваться поперечная модель движения автомобиля, предлагаемая на рис. 1

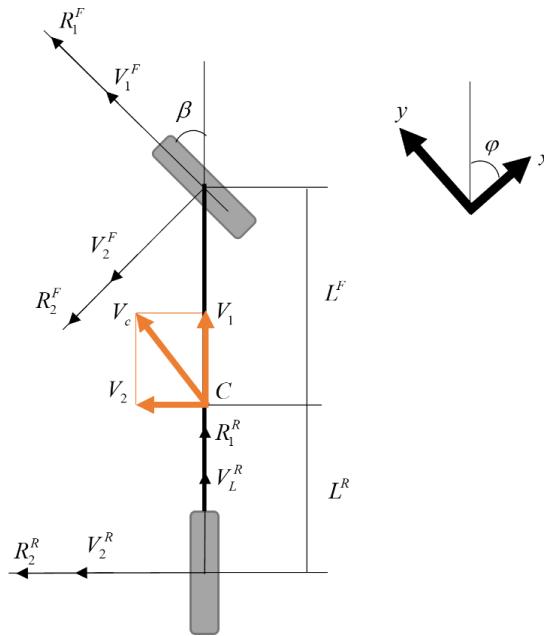


Рис. 1. Расчетная схема движения

Тогда модель динамики движения автомобиля будет иметь вид [6]:

$$\begin{aligned} m(\dot{V}_1 - \omega \cdot V_2) &= R_1^R + R_1^F \cos \beta - R_2^F \sin \beta + Q_1; \\ m(\dot{V}_2 - \omega \cdot V_1) &= R_2^R + R_2^F \sin \beta - R_1^F \cos \beta + Q_2; \\ J \dot{\omega}(t) &= (R_1^F \sin \beta + R_2^F \cos \beta)L^F - R_2^R L^R + \xi; \\ J^R \dot{\omega}^R(t) &= \tau^R - R_1^R r^R - \eta^R; \\ J^F \dot{\omega}^F(t) &= \tau^F - R_1^F r^F - \eta^F; \\ \dot{x}_c(t) &= V_1 \cos \varphi - V_2 \sin \varphi; \\ \dot{y}_c(t) &= V_1 \sin \varphi + V_2 \cos \varphi; \\ \dot{\phi}(t) &= \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где C – центр массы автомобиля, τ^F и τ^R – формирующие моменты движения переднего и заднего колес, Q_1 и Q_2 – внешние силы, ξ – суммарный момент колес, r^F и r^R – радиусы переднего и заднего колеса автомобиля, m – масса автомобиля, J^F и J^R – моменты инерции передней и задней оси.

При рассмотрении системы управления движением автомобиля будем рассматривать как движение, так и торможение и определяющие силы реакции R^F и R^R таким образом прикладываемым к точке соприкосновения колесо-поверхность и являющимися проекциями соответственно равны [7]:

$$\begin{aligned} R_1^F &= -C_1 \frac{V_{S1}^F}{|V_1^F|}; \\ R_2^F &= -C_2 \frac{V_2^F}{|V_1^F|}; \\ R_1^R &= -C_1 \frac{V_{S1}^R}{|V_1^R|}; \\ R_2^R &= -C_2 \frac{V_2^R}{|V_1^R|}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тормозящие моменты автомобиля переднего и заднего колеса η^F и η^R определяются как [7]:

$$\begin{aligned} \eta^F &= V_0 / r^F * 0.5, \\ \eta^R &= V_0 / r^R * 0.5, \end{aligned} \quad (3)$$

где V_0 – результирующая скоростей V_1 и V_2 .

Тогда скорости для передних и задних колес быть выражены как:

$$\begin{aligned} V_1^F &= V_1 \cos \beta + (V_2 + \omega L^F) \sin \beta, \\ V_2^F &= -V_1 \sin \beta + (V_2 + \omega L^F) \cos \beta \\ V_1^R &= V_1, \\ V_2^R &= V_2 - \omega L^R. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_{S1}^F &= V_1^F - \omega^F r^F \\ V_{S2}^F &= V_2^F, \\ V_{S1}^R &= V_1^R - \omega^R r^R, \\ V_{S2}^R &= V_2^R. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_{SF}^F &= \sqrt{V_{S1}^{F2} + V_{S2}^{F2}}, \\ V_{SF}^R &= \sqrt{V_{S1}^{R2} + V_{S2}^{R2}}, \\ V_c &= \sqrt{V_1^2 + V_2^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где V_S^F и V_S^R – это скорости скольжения для переднего и заднего колес в продольной плоскости.

B. Моделирование движения

При моделировании и проверки на адекватность математической модели использовался автомобиль – колесный робот со следующими параметрами [7]:

$$\begin{aligned} m &= 150 \text{ кг}, \quad J = 82 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad \beta = 0,1 \text{ рад}, \quad L^R = 0,5 \text{ м}, \\ L^F &= 0,5 \text{ м}, \quad J^R = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad r^R = 0,3 \text{ м}, \quad r^F = 0,3 \text{ м}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau^F &= 0H \cdot m, \quad \tau^R = 5H \cdot m, \quad C_1 = 500, \quad C_2 = 500, \quad \xi = 0, \\ \eta^R &= 0, \quad \eta^F = 0\end{aligned}$$

Примем во внимание, что на автомобиль действуют аэродинамические силы, направленные вдоль абсцисс и ординат соответственно:

$$\begin{aligned}Q_1 &= F_{wind}(\sin(\alpha)) + a_1 V_1 + a_2 V_2^2, \\ Q_2 &= F_{wind}(\cos(\alpha)),\end{aligned}\quad (7)$$

где $F_{wind} = 8H$ – сила ветра, направленная под углом $\alpha = 0.52$ к оси абсцисс, $a_1 = 1, a_2 = 0$ – безразмерные коэффициенты.

На рис. 2 показано моделирование предложенной модели движения автомобиля при езде по окружности с выбранными параметрами.

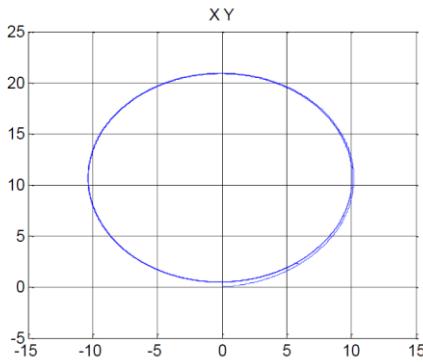


Рис. 2. Траектория движения автомобиля

C. Синергетический синтез регулятора движения автомобиля

Использование полной нелинейной модели движения (1) накладывает существенные ограничения на использование алгоритмов управления таких как ПИД регулирование, LQR управление и других. Для решения данной задачи использовались синергетические подходы к управлению как метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), в полной мере учитывающий и отражающий нелинейную динамику движения автомобиля без упрощений и линеаризации [8].

Согласно методу АКАР, для синтеза необходимо определить каналы управления и инварианты исходя из требований к задаче управления.

Используя модель движения (1), каналом управления будет тяговый момент подаваемый на задний колеса τ^R , инвариантом (целью управления) же будет стабилизация результирующей скорости $V_0 = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$.

Рассматривая математическую модель (1) V_1 или V_2 определяют результирующее значение V_0 и следовательно влияют на нее, при этом через τ^R можно воздействовать на V_1 . Из системы (1) также следует, что управление переменной V_1 можно осуществить используя ω^R , однако вследствие отсутствия последней в правой части системы, управление будем осуществлять через силу R_1^R .

Введем первую макропеременную согласно процедуре АКАР:

$$\psi_1 = R_1^R - \varphi_1, \quad (8)$$

где φ_1 – это внутреннее управление. Основное функциональное уравнение, согласно процедуре, записывается как [8]:

$$T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 = 0, \quad (9)$$

где T_1 – параметр регулятора, определяющего скорость протекания процесса и попадания на инвариантное многообразие.

С учетом (2)-(6), а также (8) и (9) получаем декомпозированную модель движения:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t) &= (\varphi_1 + R_1^F \cos \beta - R_2^F \sin \beta + Q_1) / m + \omega V_2; \\ \dot{V}_2(t) &= (R_2^R + R_1^F \sin \beta + R_2^F \cos \beta + Q_2) / m - \omega V_1; \\ \dot{\omega}(t) &= ((R_1^F \sin \beta + R_2^F \cos \beta)L^F - R_2^R L^R + \xi) / J; \\ \dot{\varphi}^F(t) &= (\tau^F - R_1^F r^F - \eta^F) / J^F; \\ \dot{x}_c(t) &= V_1 \cos \varphi - V_2 \sin \varphi; \\ \dot{y}_c(t) &= V_1 \sin \varphi + V_2 \cos \varphi; \\ \dot{\varphi}(t) &= \omega.\end{aligned}\quad (10)$$

Затем в декомпозированной системе (10) производится синтез управления φ_1 и вводится конечная макропеременная, определяющая инвариант и конечную цель в алгоритме управления:

$$\psi_2 = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} - V_0 \quad (11)$$

и соответствующее ему функциональное уравнение

$$T_2 \frac{d\psi_2}{dt} + \psi_2 = 0, \quad (12)$$

Далее с нахождением внутреннего управления φ_1 подставляем в декомпозированную систему и находим выражения для искомого управления.

D. Моделирование замкнутой системы

Для проверки работоспособности системы проводилось моделирование с использованием пакетов Maple и Matlab. Для системы задавалось некоторое ограничение для тяги τ^R не больше 20 Н·м, значения коэффициентов $Q_{1,2} = 0$, $\beta = 0$

Конечной целью управления является результирующая скорость движения $V_0 = 2 \text{ м/с}$.

Результаты моделирования представлены на рис. 3-6

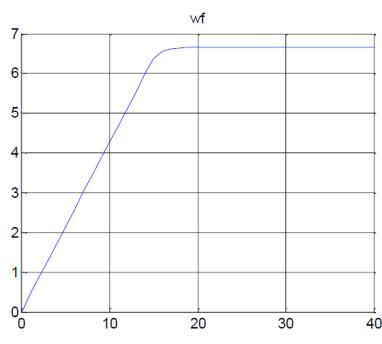


Рис. 3. Угловая скорость ω^F

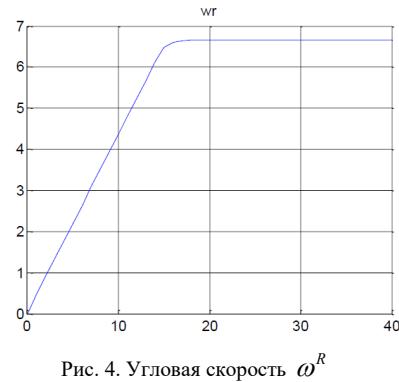


Рис. 4. Угловая скорость ω^R

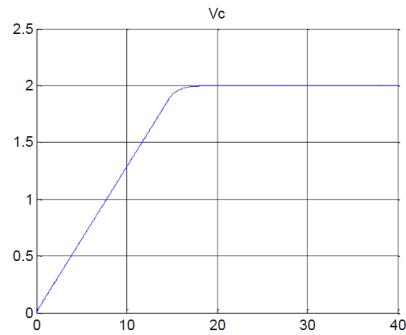


Рис. 5. Результирующая скорость V_0

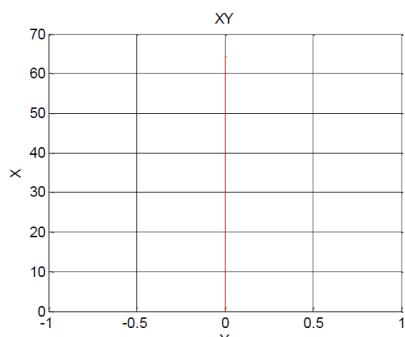


Рис. 6. Траектория движения

Далее немного изменим сценарий на следующий: с 0 до 25 сек – скорость 2м/с, с 25 до 50 секунд – скорость 4м/с, с 50 до 85 – торможение до 0.

Результирующий график скорости показан на рис. 7

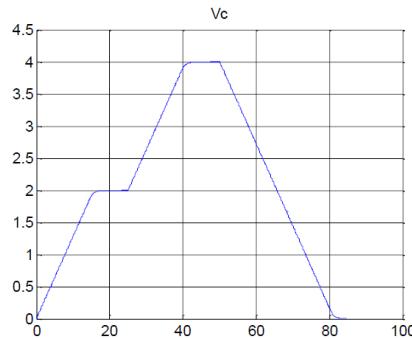


Рис. 7. Результирующая скорость V_0

Как видно из результатов конечная цель управления достигается за корректное время, а значит выбранный алгоритм был выбран верно.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был синтезирован синергетический регулятор движения автомобиля в плоскости с решением задачи поддержания скорости в заданном сценарием значении. Полученные результаты достигнуты с использованием полной нелинейной модели благодаря методу АКАР. Результаты моделирования переходных процессов показывают высокую эффективность и перспективность использования данного похода в системах управления транспортом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
2. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – 2-е изд. – М.: ЛиброКом, 2012. – 240 с.
3. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления. Ч. II. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.
4. Herring J.A., Burnham K.J., Oleksowicz S. Review and Simulation of Torque Vectoring Yaw Rate, Control International Conference on Systems Engineering 2012 (ICSE). – P. 1-6.
5. Kwang Hee Nam. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. – CRC Press, 2019
6. Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles, Wiley-Interscience. – 3rd. ed. – 2001. – 428 p.
7. Бурдаков С.Ф. Системы управления движением колесных роботов. – СПб.: Наука, 2001. – 227 с.
8. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. Ч. III. 2000. – 656 с.

Алгоритм программного управления для нефтяной скважины с частотно-регулируемым ЭЦН в условиях неопределенности

Лапик Олег Игоревич

Кафедра кибернетических систем
Тюменский индустриальный университет
Тюмень, Россия
x-rax2@yandex.ru

Соловьев Илья Георгиевич

Кафедра кибернетических систем
Тюменский индустриальный университет
Тюмень, Россия
igsolovyyev123@gmail.com

Аннотация. Представленные исследования развивают опубликованные ранее результаты по конструированию закона частотного регулирования подачи для скважины обустроенной ЭЦН при отработке плановой производительности. В данной работе полученные ранее результаты обобщаются на случай, когда ключевые настроочные параметры программного регулятора (подпор пласта и обводнённости флюида) заданы с интервальной неопределенностью.

Abstract. The presented studies develop the previously published results on the construction of the law of frequency regulation for a well equipped with ESP. In this work, the results obtained earlier are summarized for the case when the key parameters of the program regulator (reservoir backwater and fluid watering) are set with interval uncertainty.

Ключевые слова: нефтяная скважина, электроцентробежный насос, неопределенность, частотное регулирование, границы функциональной устойчивости.

Keywords: oil well, electric submersible pump, uncertainty, frequency control, limits of functional stability.

I. ВВЕДЕНИЕ

Регулировка частоты питающего напряжения по предписанным возмущениям плановой производительности при отработке кратковременных программ квотирования или компенсации недоборов, одна из главных диспетчерских функций реализуемая программным регулятором.

Особенность представленных результатов в переносе концепции программного регулирования на задачи частотного управления производительностью скважины, обустроенной погружным электроцентробежным насосом (ЭЦН). В отличие от техники замкнутого регулирования расчёт программных траекторий управления основан на полном знании математической модели объекта. В технологиях нефтедобычи наличие и надежность автоконтроля глубинных режимных состояний для реализации замкнутых законов управления, далеко не всегда обеспечены.

Пусть

$$q(k) = \mathcal{P}(\omega(k))$$

барометрическая модель скважины, устанавливающая связь производительности – $q(k)$, [$\text{м}^3/\text{сут}$] с относительной частотой – $\omega(k)$ питающего напряжения. Если расчёт $q(k)$ по графику $\omega(k)$ именуется прямой задачей, то формирование программы частотного регулирования $\omega_p(k)$ по соответствующему план-графику производительности $q_p(k)$ для заданного горизонта планирования k_F :

$$\omega(k) = \arg \{q(k) = q_p(k)\}$$

является обратной:

$$\omega_p(k) = \mathcal{P}^{-1}(q_p(k)).$$

Здесь $k \in K = \{0, 1, 2, \dots, k_F\}$ – координата дискретного времени на горизонте планирования - k_F .

Решение данной задачи осложнено двумя обстоятельствами:

- Любые частотно возмущённые режимы эксплуатации должны реализовываться в границах функциональной устойчивости работы насоса по динамическому уровню над приёмом – $h(4, k) \geq h^{LIM}$ и доле свободного газа – $\beta_{GN}(k) \leq \beta^{LIM}$ у первой ступени. Если предписанное возмущение выводит систему за ограничение, то программный регулятор стабилизирует режим подачи по границе ближайшего ограничения на пределе допустимой производительности. Именно такое решение было реализовано в [1].
- Наличие вызванных различными причинами [2, 3] факторов неопределенности в параметрическом описании модели скважины не гарантирует строгое исполнение плановых поручений. Но и в этих условиях оценка границ возможных отклонений от плана не должна пересекать оценки границ функциональной устойчивости.

Формализация задачи и схема реализации закона программного регулирования с «нестрогой» стабилизацией плана и интервальной моделью эволюции данных о пластовом давлении – $p_R(k) \in [\underline{p}_R(k), \bar{p}_R(k)]$ и обводнённости притока – $\beta_R(k) \in [\underline{\beta}(k), \bar{\beta}(k)]$ рассматривается ниже.

II. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

A. Модель объекта управления

Несмотря на то, что скважинная система по своей природе является динамической, в практике реальной эксплуатации график предписанной производительности устанавливается без учета переходных процессов.

По этой причине для описания нефтяной скважины с ЭЦН воспользуемся линейной барометрической моделью равновесных состояний [4], устанавливающей связь между дрейфующими параметрами, переменными состояния, управляющим воздействием — $\omega(k)$ [ед] и производительностью скважины — $q(k)$ [$\text{м}^3/\text{сут}$].

Отметим, что дрейфам могут быть подвержены практически все параметрические настройки модели, мы же ограничимся выделением объявленных ранее среднепластовым давлением $p_R(k)$ [МПа] и обводненностью притока $\beta(k)$ [ед].

Функциональная схема не фонтанирующей нефтяной скважины с ЭЦН представлена на рис. 1.

Для дальнейшего построения расчетных схем модель сведена к системе трех уравнений $\mathcal{P} = \{\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \mathcal{P}_3\}$:

$$\mathcal{P}_1: p(3, k) = p_R(k) - r_K q(k) - \gamma(k)(H_R - H_N + r_K q(k)), \quad (1)$$

где $p(3, k)$ — давление у приемной сетки [МПа] на уровне подвески насоса (по вертикали) — H_N [м], $w_R = 1/r_R$ — коэффициент продуктивности скважины [$\text{м}^3/\text{МПа}\cdot\text{сут}$], H_R — уровень забоя скважины (по вертикале) [м], r_K — гидросопротивление сегмента обсадной колонны от забоя до приема насоса [$\text{сут}/\text{м}^2$], удельный вес водонефтяной смеси в нормальных термобарических (НТБ) условиях

$$\gamma(k) = (1 - \beta(k))\gamma_O + \beta(k)\gamma_W$$

образованный долями весов нефти — γ_O и воды — γ_W [МПа/м] при обводненности $\beta(k)$.

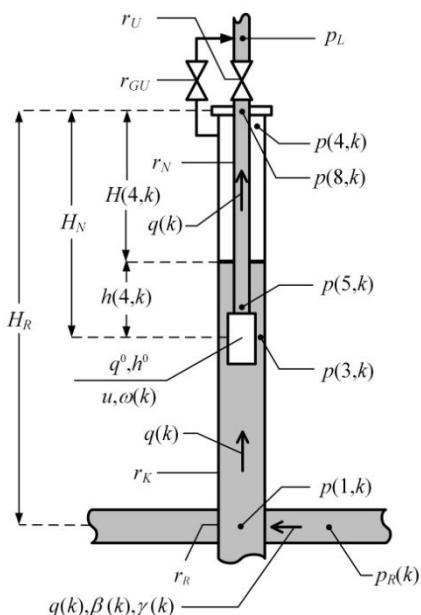


Рис. 1. Функциональная схема скважины (пояснения в тексте)

$$\mathcal{P}_2: \lambda_0(i) h^0 \omega(k)^2 - \lambda_1(i) \frac{h^0}{q^0} q(k) \omega(k) = (r_U + r_N + r_K + \frac{r_R}{\gamma(k)}) q(k) - \Delta H_R(k), \quad (2)$$

где q^0 и h^0 — параметры типоразмера насоса по номиналу производительности [$\text{м}^3/\text{сут}$] и напору [м], $\lambda_0(i), \lambda_1(i)$ — коэффициенты кусочно-линейной аппроксимации напорной характеристики насоса (подробнее в [4]), r_U и r_N — гидросопротивления устьевого штуцера и насосно-компрессорной трубы (НКТ) [$\text{сут}/\text{м}^2$], $\omega(k)$ — относительная частота вращения вала двигателя [ед] и потенциал напора пласта [м], заданный выражением:

$$\Delta H_R(k) = \frac{p_R(k) - p_L}{\gamma(k)} - H_R$$

для не фонтанирующих скважин остается отрицательным ($\Delta H_R(k) < 0$).

$$\mathcal{P}_3: p(3, k) = p_L + \sqrt{\omega(k)} r_{GU} a_{GU}(k) \times (p_{G0} - p(3, k)) q(k) + \gamma(k) h(4, k), \quad (3)$$

где p_L — контролируемое противодавление нефтесборной сети [МПа], r_{GU} — гидросопротивление устьевого штуцера [$\text{сут}/\text{м}^2$], $h(4, k)$ — динамический уровень жидкости в затрубном пространстве (ЗТ) [м], $a_{GU}(k) = \chi_G k_S (1 - \beta(k)) \mu_R^0(3)$ — комплексный параметр, определяющий интенсивность передачи отсепарированного газа в ЗТ, k_S — коэффициент сепарации, χ_G — настроочный коэффициент,

Комплексный параметр модели разгазирования — $\mu_R^0(3) = G \frac{\alpha_G(3)p_0}{p_{G0}-p_0}$ включает: газовый фактор — G [$\text{м}^3/\text{м}^3$], давление насыщения нефти газом — $-p_{G0}$ давление атмосферном — p_0 [МПа] и настроичном коэффициенте $\alpha_G(3)$ [2, 5].

B. Алгоритм программного регулирования

Рассмотрим задачу формирования программы частотного регулирования $\omega = \{\omega(k)\}$ на основе системы модельных уравнений (1,2,3) при априорно известной эволюции параметров — среднепластового давления $\mathbf{p}_R = \{p_R(k)\}$ и обводненности $\boldsymbol{\beta} = \{\beta(k)\}$.

Соответствующее управляющее воздействие $\omega_P(k)$ для отработки плановой производительности $q_P(k) \in \mathbf{q}_P$ для каждого $k \in K$ может быть рассчитано на основе второго уравнения (2) модели при $q(k) = q_P(k)$:

$$\omega_P(k) = \mathcal{P}_2^{-1}(p_R(k), \beta(k) | q_P(k)).$$

Процесс эксплуатации погружного оборудования, в особенности при частотно-регулируемых режимах, связан с опасностью выхода в предварийное состояние срыва подачи. В соответствии с этим введем два функциональных ограничения.

1) Предельная объемная доля свободного газа у первой ступени насоса:

$$\beta_{GN}(k) \geq \beta_G^{LIM}$$

что эквивалентно условию на предельное снижение давление у приема насоса:

$$p(3, k) \geq p_G(3, k) = \frac{\mu_{RS}(k)}{\mu_{RS}(k) + \alpha_\beta}, \quad (4)$$

где $\mu_{RS}(k) = \left(1 - k_S\sqrt{\omega(k)}\right)(1 - \beta(k))\mu_R^0(3)$, $\alpha_\beta = \beta_G^{LIM}/(1 - \beta_G^{LIM})$.

2) Предел снижение уровня жидкости над приемом насоса:

$$h(4, k) \geq h^{LIM} \quad (5)$$

упреждающего оголение приемной сетки насоса.

Примем, что $q_\beta(k)$ – предел производительности с соответствующей ему частотой $\omega_\beta(k)$, когда скважинная система находится на границе функциональной устойчивости по ограничению (4) при $(p_R(k), \beta(k))$. Тогда расчет граничных состояний сводится к совместному решению системы (1) и (2) при условии $p(3, k) = p_G(3, k)$

$$q_\beta(k) = \mathcal{P}_1(p_R(k), \beta(k) | p_G(3, k))$$

$$\omega_\beta(k) = \mathcal{P}_2^{-1}(p_R(k), \beta(k) | q_\beta(k), p_G(3, k))$$

с рекуррентной балансировкой уровня частоты $\omega_\beta(k)$, получаемой на основе второго уравнения (2).

По аналогии, предел производительности $q_h(k)$ по ограничению на снижение уровня над приемом насоса (5), на основе модельных уравнений может быть рассчитан на основе совместного решения уравнений (1) и (3) при начальном приближении $\omega_h(k)$:

$$q_h(k) = \mathcal{P}_1(p_R(k), \beta(k) | p(3, k))$$

$$p(3, k) = \mathcal{P}_3^{-1}(p_R(k), \beta(k) | q_h(k), \omega_h(k), h^{LIM})$$

с последующей рекуррентной балансировкой равновесного значения частоты, получаемой по второму уравнению модели (2):

$$\omega_h(k) = \mathcal{P}_2^{-1}(p_R(k), \beta(k) | q_h(k), p(3, k)).$$

В условиях действия (4) и (5) задача формирования программы частотного регулирования сводится к выбору итогового управляющего воздействия $\omega(k)$ в каждый момент формирования программы $k \in K$ удовлетворяющего:

$$\omega(k) = \arg\{q(k) = \min\{q_P(k), q_\beta(k), q_h(k)\}\}. \quad (6)$$

Таким образом, при отсутствии нарушения функциональных ограничений $q_P(k) \leq \min\{q_h(k), q_G(k)\}$ управляющим воздействием принимается соответствующая частота для обеспечения плановой производительности $\omega(k) = \omega_P(k)$. В ином случае осуществляется переход на стабилизацию ближайшего ограничения, при максимально возможной производительности, сохраняющей функциональную устойчивость системы.

C. Интервальная неопределенность дрейфующих параметров модели

Пусть фактор неопределенности в условиях истощения пласта, связанный с дрейфом ключевым параметрами модели скважины, вводится расширяющимися интервалами своих возможных значений

$$p_R(k) \in [\underline{p}_R(k), \bar{p}_R(k)]; \beta(k) \in [\underline{\beta}(k), \bar{\beta}(k)] \quad (7)$$

что для каждого фиксированного k можно отразить в пространстве параметров прямоугольником с пронумерованными вершинами $j = \{1, 2, 3, 4\}$, как на рис. 2.

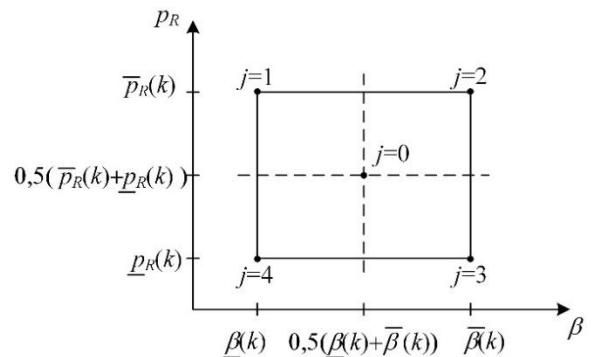


Рис. 2. Область неопределенности

Наличие неопределенности приводит к «размытости» возможных состояний системы. В этих условиях не удается гарантировать строгое выполнение плановых поручений.

Пусть программная траектория управления в условиях (7) рассчитывается по среднему значению области неопределенности, отмеченной на рис. 2 индексом $j = 0$:

$$\omega_P(k) = \mathcal{P}_2^{-1}(p_R(k, 0), \beta(k, 0) | q_P(k)).$$

Соответствующие оценки разброса производительности для каждого $j = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ могут быть получены при решении второго модельного уравнения (2):

$$\hat{q}(k, j) = \mathcal{P}_2(p_R(k, j), \beta(k, j) | \omega_P(k)).$$

Критерий функциональной устойчивости согласно принятым ограничениям (4) и (5) в условиях неопределенности (7), будем связывать с выполнением отношения

$$\hat{q}(k, j) \leq q^{LIM}(k, j) = \min\{q_\beta(k, j), q_h(k, j)\} \quad (8)$$

для каждой из обозначенных точек области параметрической неопределенности $j = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ (рис. 2).

Тогда, программа частотного управления для каждого k -го момента времени должна определяться условием

$$\omega(k) = \arg\{q(k) = \min\{q_P(k), q^{LIM}(k)\}\},$$

где $q^{LIM}(k) = \min\{q^{LIM}(k, j)\}$ – предел производительности по перебору j из условия (8), для k -го момента времени.

Подробнее логику выбора управляющего воздействия рассмотрим далее на примере.

III. Вычислительный эксперимент

В качестве примера рассмотрим задачу формирования программы частотного управления $\omega = \{\omega(k)\}$ для нефтанирующей нефтяной скважины с ЭЦН по заданному плану графику $q_P(k) \in \mathbf{q}_P$ с горизонтом планирования $k \in K = \{0, 1, \dots, 30\}$:

$$q_P(k) = \begin{cases} 100, & \text{если } k < 5 \\ 120, & \text{если } 5 \leq k < 10 \\ 100, & \text{если } k > 15 \end{cases}$$

Эволюцию параметров пласта в условиях истощения залежи введем моделью, линейно экстраполирующей интервалы снижения пластового давления и роста обводненности по законам:

$$p_R(k) \in [p_R(k) = (1 - \alpha_R k)p_R(0); \bar{p}_R(k) = \bar{p}_R(0)]$$

$$\beta(k) \in [\underline{\beta}(k) = \underline{\beta}(0); \bar{\beta}(k) = (1 + \alpha_\beta k)\bar{\beta}(0)]$$

$$\text{Здесь } \alpha_R = \frac{1}{k_F} \left(1 - \frac{p_R(0)}{p_R(30)} \right) \text{ и } \alpha_\beta = \frac{1}{k_F} \left(\frac{\bar{\beta}(30)}{\bar{\beta}(0)} - 1 \right)$$

коэффициенты наклона прямой, образуемой парой значений параметра в начальный и конечный моменты формирования программы.

Параметрические настройки модели для данного примера сведены в табл. 1. Сформированная область неопределенности представлена на рис. 3.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ НАСТРОЙКИ МОДЕЛИ

Параметр	Значение	Параметр	Значение
p_L	1,5	ΔH_R	-500
q^0	100	h^0	2700
γ_G	0,005	γ_W	0,011
H_R	2800	H_N	2400
r_R	0,115	r_K	0,16
r_N	3,6	r_U	4,32
r_{GU}	4	p_{G0}	14,41
k_S	0,7	G	140
χ_G	0,000008	$\alpha_G(3)$	0,4
h^{LIM}	100	β_G^{LIM}	0,25
$\bar{p}_R(0)$	21,21	$\beta_G(0)$	0,38
$p_R(0)$	19,97	$\bar{\beta}(0)$	0,42
$p_R(30)$	16,47	$\bar{\beta}(30)$	0,6

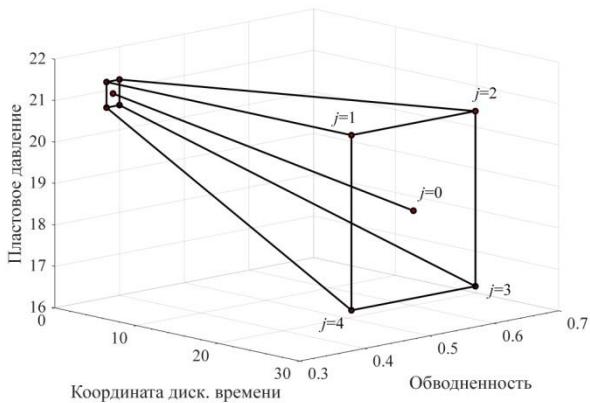


Рис. 3. Сформированная область параметрической неопределенности

Результаты расчета программы частотного управления и моделирования ее реализации при априорно известной динамике пластовых условий в границах интервальной неопределенности представлены на рис. 4.

Важно отметить, что пример носит иллюстративный характер и направлен, в первую очередь, на демонстрацию работы алгоритма. Очевидно, что в условиях реальной эксплуатации динамика принятия решения по изменению целевой производительности (план-графика) кратно выше динамики пластовых условий.

На рис. 4. вынесены следующие графики и обозначения:

Совместный график 1 – пластового давления p_R и обводненности β , с расширяющейся неопределенностью выделенной цветом и линии «реальной» динамики этих параметров

График 2 – сформированная программа частотного управления ω по заданным с интервальной неопределенностью параметров пласта.

Совместный график 3 – плановой производительности q_P , выделенная цветом область, образованная максимальным и минимальным значение оценок производительности \hat{q} , пунктирная линия динамики средней точки ($j = 0$) области неопределенности, линии производительности скважины q и пределы производительности q_B и q_h при моделировании априорно известной динамики p_R и β .

Графики 4 и 5 графики отражают изменения давления у приема $p(3)$ и уровня жидкости $h(4)$ с соответствующими предельными значениями.

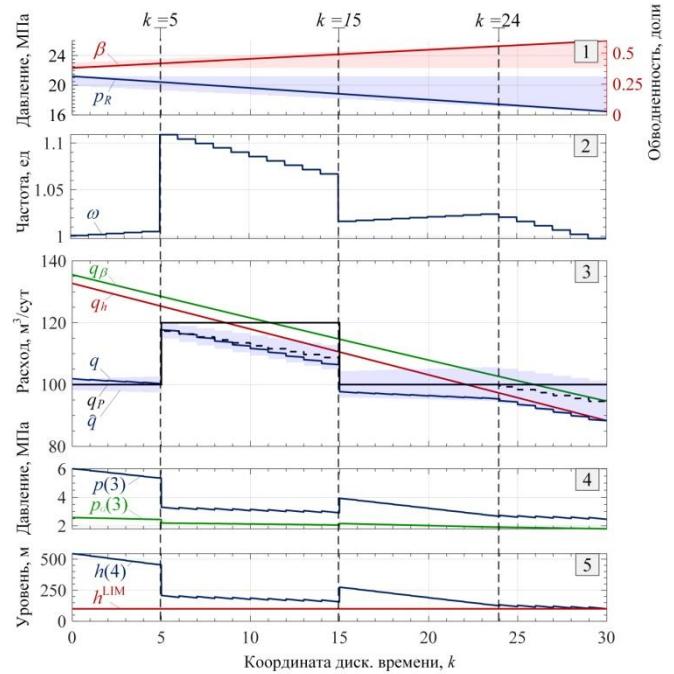


Рис. 4. Результаты формирования программы управления и ее реализации

На графике 3 рис. 4 видно, что от начального момента и до $k = 5$, управляющее воздействие сформировано в соответствии с установленным план-графиком производительности. В момент повышения предписанной производительности до $q_P = 120 \text{ м}^3/\text{сут}$ отмечается, что происходит снижение производительности q с постепенным сближением с пределом производительности по динамическому уровню q_h . Рассмотрим распределение производительностей при $k = 5$ в ключевых точках области неопределенности j , что представлено на рис. 5.

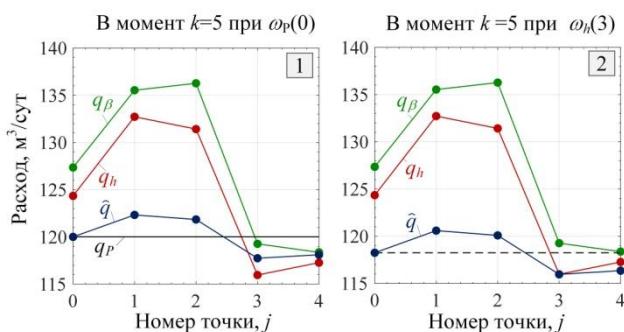


Рис. 5. Анализ распределения производительностей в ключевых точках области неопределенности

В случае выбора в качестве управляющего воздействия частоты для обеспечения плановой производительности $\omega_p(5,0)$, как это представлено на графике 1 рис. 5, оценки производительности \hat{q} в 3 и 4 точке находятся выше соответствующих пределов по динамическому уровню. В соответствии с этим, по условию минимума среди пределов в точках с нарушением, в качестве управляющего воздействия принимается частота $\omega_h(5,3)$, рассчитанная при поиске соответствующего предела $q_h(5,3)$.

Далее, до момента $k = 15$, выбор управляющего воздействия происходит тем же образом, обуславливая переход на режим стабилизации границы по уровню.

Назначенная в момент $k = 15$ плановая производительность $q_p = 100$ является выполнимой до момента $k = 24$, когда в следствии роста неопределенности не происходит повторный переход на режим стабилизации граничного условия. Моделируемая «реальная» динамика параметров пласта также находится ближе к границам интервальной неопределенности, что проявляется в соответствующих сближениях производительности и уровня жидкости с их предельными значениями.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫВОДЫ

Сформированная по алгоритму программа частотного управления обеспечивает максимально возможное выполнение план-графика предписанной производительности, заданного в условиях наличия интервальной неопределенности параметрического описания модели, упреждая выход системы за границы принятых функциональных ограничений по газовому фактору и уровню жидкости над приемом насоса.

В условиях неопределенности невозможно гарантировать точное соблюдения плановых поручений. Дополнительно ситуация обостряется, если неопределенность имеет тенденцию к росту, что соответственно приводит к увеличивающимся отклонениям производительности и вынуждает «строже» учитывать ограничения с целью сохранения функциональной устойчивости системы.

В этой связи, ключевое значение приобретает своевременная идентификация параметров модели, что позволит уменьшить интервал возможной вариации дрейфующих параметров и повысить точность формирования программы управления.

ЛИТЕРАТУРА

- Соловьев И.Г., Говорков Д.А., Лапик О.И. Программная стабилизация плановой производительности с контролем функциональных ограничений для скважины с электроцентробежным насосом. – Текст: непосредственный // Автоматизация и информатизация ТЭК. – М., 2024. – № 2 (607). – С. 34-42.
- Алиев З.С., Самуилова Л.В. Газогидродинамические исследования газовых и газоконденсатных пластов и скважин. – М.: МАКС Пресс, 2011. – 340 с.
- Ипатов А.И., Кременецкий М.И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов. – М.: Изд-во Института компьютерных исследований, 2006. – 780 с.
- Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Оптимизация параметров обустройства и режима эксплуатации скважины с ЭЦН в условиях осложнений. – Текст: непосредственный // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – М., 2019. – № 9 (554). – С. 28-35.
- Мищенко И.Т. Расчеты при добыче нефти и газа. – М.: Изд-во «НЕФТЬ и ГАЗ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2008. – 296 с.

Следящий регулятор для системы управления опорно-поворотным устройством оптического телескопа

Алмаз Александра Алексеевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
almaz@sfedu.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача синтеза следящего регулятора для системы управления опорно-поворотным устройством оптического телескопа. Предложена методика синергетического синтеза векторного следящего регулятора, который обеспечивает двухосное слежение за движущимися объектами. Особенностью объекта управления является нелинейность и многомерность его математической модели, что учитывается при синтезе регулятора. Синтез регулятора выполнен с использованием методом АКАР и проведено моделирование замкнутой системы, результаты которого подтверждают работоспособность и эффективность синтезированного следящего регулятора.

Abstract. The paper deals with the problem of synthesis of a tracking controller for the control system of the pivoting device of an optical telescope. The methodology of synergistic synthesis of vector tracking controller, which provides biaxial tracking of moving objects, is proposed. The peculiarity of the control object is the nonlinearity and multidimensionality of its mathematical model, which is taken into account in the controller synthesis. The controller synthesis is performed using the ACAR method and the closed-loop system modelling is carried out, the results of which confirm the operability and efficiency of the synthesized tracking controller.

Ключевые слова: опорно-поворотное устройство, телескоп, следящее управление, синергетический синтез регулятора.

Keywords: pivoting device, telescope, tracking control, controller synergistic synthesis.

I. ВВЕДЕНИЕ

Оптические телескопы необходимы для наблюдения и слежения за космическими объектами, например за искусственными спутниками Земли, космическими аппаратами или за космическим мусором, который находится в околоземном пространстве [1].

Сегодня развитие космической отрасли требует создания и совершенствования точных и надежных систем управления для оптических телескопов, построенных на базе опорно-поворотных устройств.

Следящий регулятор для системы управления опорно-поворотным устройством оптического телескопа становится необходимым инструментом для обеспечения высокой точности наведения телескопа на наблюдаемые

объекты. Поэтому был синтезирован векторный регулятор для четырехмассового объекта, который обеспечивает двухосное слежение.

Оси опорно-поворотного устройства (ОПУ) физически связаны, так как суммарный момент инерции азимутальной оси содержит переменную составляющую, которая зависит от положения угломестной оси.

Линейные методы не способны учесть нелинейность в модели азимутальной оси, соответственно ею пренебрегали. Тогда в следствии постоянства угла места, векторное управление по двум осям оказывается невозможным. В работах [2–9] аналогично использовались линейные модели, следовательно, одноосное управление.

Поэтому для решения задачи синтеза следящего регулятора в работе используются принципы и методы синергетической теории управления [10–13], который позволяет учесть нелинейность и многомерность математической модели объекта управления. Предлагается методика синергетического синтеза векторного следящего регулятора, который будет изменять угловое положение второй и четвертой массы в соответствии с поступающими линейными сигналами.

II. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Опорно-поворотное устройство оптического телескопа – это механизм, который позволяет изменять положение и ориентацию телескопа в пространстве. Это основная часть телескопа, поскольку позволяет исследователям направлять его на интересующие объекты в небесной сфере.

ОПУ имеет фиксированное основание, на котором установлена вилка, для поворота относительно азимутальной оси. В вилке установлен средник с оптическим блоком для поворота вокруг угломестной оси.

Средник с оптическим блоком и вилка соответственно снабжены приводами для вращения относительно осей. Электроприводами ОПУ осуществляется наведение на заданную точку и слежение за движущимся объектом. На рис. 1 представлена принципиальная схема ОПУ [14, 15].

Угломестная и азимутальная оси ОПУ являются неустойчивыми то есть, могут подвергаться изгибу или деформации под воздействием внешних нагрузок или сил.

Нежесткость осей может привести к неточности в ориентации и управлении ОПУ. Для обеспечения точности работы необходимо учитывать этот факт.

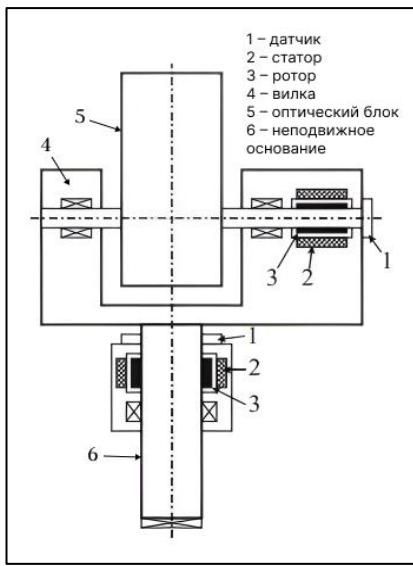


Рис. 1. Схема ОПУ телескопа

Механическая система ОПУ может быть представлена четырехмассовой моделью с учетом углов поворотов масс. Относительно угломестной оси: J_1 – суммарный момент инерции ротора двигателя, вала оси и внутренних колец подшипников, J_2 – момент инерции трубы телескопа. Относительно азимутальной: J_3 – суммарный момент инерции ротора двигателя, вала оси и внутренних колец подшипников верхней и нижней осей и J_4 – суммарный момент инерции средника с трубой телескопа и вилки. Он не является постоянным так как меняется момент инерции трубы телескопа при изменении угла места [2, 3].

Первая и вторая массы, соответственно третья и четвертая, соединены безынерционными упругими валами.

К первой и третьей массам приложены врачающие моменты $M_{\text{дв}1}$ и $M_{\text{дв}2}$.

$$\begin{aligned}\frac{d\alpha_1}{dt} &= \omega_1, \\ \frac{d\alpha_2}{dt} &= \omega_2, \\ \frac{d\alpha_3}{dt} &= \omega_3, \\ \frac{d\alpha_4}{dt} &= \omega_4, \\ \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{M_{\text{дв}1}}{J_1} - \frac{M_{\text{уп}1}}{J_1} - \frac{M_{\text{демп}1}}{J_1} - \frac{M_{\text{вт}1}}{J_1}, \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{M_{\text{уп}1}}{J_2} + \frac{M_{\text{демп}1}}{J_2} - \frac{M_{\text{вт}1}}{J_2}, \\ \frac{d\omega_3}{dt} &= \frac{M_{\text{дв}2}}{J_3} - \frac{M_{\text{уп}2}}{J_3} - \frac{M_{\text{демп}2}}{J_3} - \frac{M_{\text{вт}2}}{J_3}, \\ \frac{d\omega_4}{dt} &= \frac{M_{\text{уп}2}}{J_4} + \frac{M_{\text{демп}2}}{J_4} - \frac{\omega_2 \Delta J \sin 2\alpha_2}{J_4} \omega_4 - \frac{M_{\text{вт}2}}{J_4}.\end{aligned}\quad (1)$$

Момент упругости определяется разностью углов поворота левого и правого концов вала:

$$M_{\text{упр}} = c(\alpha_1 - \alpha_2),$$

где c – коэффициент жесткости вала.

Момент демпфирования определяется:

$$M_{\text{демп}} = k(\omega_1 - \omega_2),$$

где k – коэффициент демпфирования вала.

Момент вязкого трения:

$$M_{\text{вт}} = a\omega,$$

где a – коэффициент вязкого трения.

Введем вектор состояния и управления:

$$\begin{aligned}x &= [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4 \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4]^T \\ U &= [M_{\text{дв}1} \quad M_{\text{дв}2}]^T\end{aligned}$$

Тогда при нулевой ветровой нагрузке модель ОПУ в переменных состояния примет следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_5, \\ \dot{x}_2(t) &= x_6, \\ \dot{x}_3(t) &= x_7, \\ \dot{x}_4(t) &= x_8, \\ \dot{x}_5(t) &= \frac{u_1}{J_1} - \frac{c_{12}(x_1 - x_2)}{J_1} - \frac{k_{12}(x_5 - x_6)}{J_1} - \frac{a_1 x_5}{J_1}, \\ \dot{x}_6(t) &= \frac{c_{12}(x_1 - x_2)}{J_2} + \frac{k_{12}(x_5 - x_6)}{J_2}, \\ \dot{x}_7(t) &= \frac{u_2}{J_3} - \frac{c_{34}(x_3 - x_4)}{J_3} - \frac{k_{34}(x_7 - x_8)}{J_3} - \frac{a_2 x_7}{J_3}, \\ \dot{x}_8(t) &= \frac{c_{34}(x_3 - x_4)}{J_4} + \frac{k_{34}(x_7 - x_8)}{J_4} - \frac{x_6 \Delta J \sin x_2}{J_4} x_8.\end{aligned}\quad (2)$$

III. СИНТЕЗ ВЕКТОРНОГО СЛЕДЯЩЕГО РЕГУЛЯТОРА С ТЕКУЩЕЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНО АППРОКСИМАЦИЕЙ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ

A. Синтез регулятора

Углы азимута и угла места изменяются линейно, следовательно на вход системы попадают два задающих сигнала, которые рассматриваются как линейные сигналы с переменными коэффициентами наклона соответствующей аппроксимирующей прямой.

Если некоторый сигнал $g(t)$ меняется линейно во времени: $g(t)=g_1 t$, то динамика, которая описывает это изменение, представляется дифференциальным уравнением $\dot{g} = g_1$ [10].

В данном случае у нас два сигнала, тогда модель синтеза следящего регулятора, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= F(x, u), \\ \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= 0, \\ \dot{z}_3 &= z_4, \\ \dot{z}_4 &= 0,\end{aligned}$$

где z_1 – переменная модели опорного сигнала $g_1(t)$, z_3 – переменная модели опорного сигнала $g_2(t)$, z_2 и z_4 – переменные, характеризующие текущие значения коэффициента наклона соответствующей аппроксимирующей прямой.

Аппроксимация используется для разбиения входного сигнала на сегменты, каждый из которых можно аппроксимировать прямой линией. Это позволяет системе управления более точно отслеживать изменения сигнала, адаптируясь к его текущему поведению.

Кусочно-линейная аппроксимация обеспечивает гибкость и точность, поскольку позволяет учитывать сложные и нелинейные зависимости входного сигнала, разбивая их на более простые линейные сегменты.

Модель (2) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_5, \\ \dot{x}_2 &= x_6, \\ \dot{x}_3 &= x_7, \\ \dot{x}_4 &= x_8, \\ \dot{x}_5 &= \frac{u_1}{J_1} - \frac{c_{12}(x_1 - x_2)}{J_1} - \frac{k_{12}(x_5 - x_6)}{J_1} - \frac{a_1 x_5}{J_1}, \\ \dot{x}_6 &= \frac{c_{12}(x_1 - x_2)}{J_2} + \frac{k_{12}(x_5 - x_6)}{J_2}, \\ \dot{x}_7 &= \frac{u_2}{J_3} - \frac{c_{34}(x_3 - x_4)}{J_3} - \frac{k_{34}(x_7 - x_8)}{J_3} - \frac{a_2 x_7}{J_3}, \\ \dot{x}_8 &= \frac{c_{34}(x_3 - x_4)}{J_4} + \frac{k_{34}(x_7 - x_8)}{J_4} - \frac{x_6 \Delta J \sin 2x_2}{J_4} x_8, \\ \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= 0, \\ \dot{z}_3 &= z_4, \\ \dot{z}_4 &= 0.\end{aligned}$$

Переменные z_2 и z_4 – кусочно-постоянные величины, а, следовательно, z_1 и z_3 являются кусочно-линейные функции времени.

Управляемыми переменными являются x_2 и x_4 – это углы поворота второй и четвертой масс.

Регулятор должен обеспечивать асимптотическое схождение управляемых переменных к переменным опорным сигналам: $x_2 \rightarrow z_1$; $x_4 \rightarrow z_3$.

Процедура синтеза регулятора состоит из двух этапов. На первом для модели синтеза применяется стандартная процедура метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) в предположении, что все переменные наблюдаются. Второй этап, заключается в получении алгоритма вычисления оценок ненаблюдаемых переменных z_2 и z_4 по значениям вектора наблюдаемых переменных x и вектора управления u , определенного на этапе 1. После этого в законе управления ненаблюдаемые переменные z_2 и z_4 меняются на их оценки \hat{z}_2 и \hat{z}_4 [10].

В соответствии с теорией АКАР законы управления обеспечивают обязательный переход изображающей точки системы из произвольного начального состояния в окрестность заданного инвариантного многообразия или как в данном – случае в окрестность пересечения инвариантных многообразий.

В процессе перехода изображающей точки от одной совокупности многообразий к другой происходит своего рода игнорирование части переменных системы.

Число этих переменных равно числу многообразий, параллельно вводимых в процессе синтеза замкнутой системы управления. Этот процесс отражает явление сжатия фазового объема в системах, которые синтезируются на основе синергетического подхода [13].

Вводится параллельная совокупность многообразий:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= x_5 - \varphi_1 = 0, \\ \psi_2 &= x_7 - \varphi_2 = 0.\end{aligned}\quad (3)$$

На инвариантных многообразиях происходит динамическая декомпозиция исходной системы, заключающаяся в уменьшении числа переменных, которые однозначно описывают её динамику. Декомпозированная система на этих многообразиях выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \varphi_1, \\ \dot{x}_2 &= x_6, \\ \dot{x}_3 &= \varphi_2, \\ \dot{x}_4 &= x_8, \\ \dot{x}_6 &= \frac{c_{12}(x_1 - \varphi_1)}{J_2} + \frac{k_{12}(\varphi_1 - x_6)}{J_2}, \\ \dot{x}_8 &= \frac{c_{34}(x_3 - \varphi_2)}{J_4} + \frac{k_{34}(\varphi_2 - x_8)}{J_4} - \frac{x_6 \Delta J \sin 2x_2}{J_4} x_8, \\ \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= 0, \\ \dot{z}_3 &= z_4, \\ \dot{z}_4 &= 0.\end{aligned}$$

«Проигнорированы» переменные x_5 и x_7 . Их динамика описывается некоторыми функциями φ_1 и φ_2 .

Последовательно вводим новую совокупность многообразий:

$$\begin{aligned}\psi_3 &= x_2 - k_1(x_2 - z_1) = 0, \\ \psi_4 &= x_4 - k_2(x_4 - z_3) = 0.\end{aligned}$$

где k_1 и k_2 – параметры, которые определяют время движения по пересечению инвариантных многообразий: чем они больше, тем быстрее закончится переходной процесс.

Изменение во времени агрегированных макропеременных ψ_3 и ψ_4 должно соответствовать решению системы дифференциальных уравнений, которые должны обладать свойством асимптотической устойчивости относительно состояний $\psi_3=0$ и $\psi_4=0$. Эти уравнения, ОФУ, определяют динамику движения изображающей точки замкнутой системы к инвариантному многообразию:

$$\begin{aligned}T_3 \dot{\psi}_3 + \psi_3 &= 0 \\ T_4 \dot{\psi}_4 + \psi_4 &= 0,\end{aligned}\quad (4)$$

где T_3 и T_4 – параметры, которые определяют время движения к пересечению инвариантных многообразий: чем меньше параметры, тем быстрее закончится переходной процесс.

Решая систему основных функциональных уравнений (4) относительно макропеременных ψ_3 и ψ_4 , находим внутренние управления φ_1 и φ_2 :

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{1}{T_3 k_{12}} (J_2 T_3 (k_1 x_3 - k_1 z_2) + J_2 (k_1 x_2 - k_1 z_1 - x_6)) - T_3 (c_{12} x_1 + c_{12} x_2 + k_{12} x_6), \\ \varphi_2 &= \frac{1}{T_4 k_{34}} (J_4 (T_4 (\Delta J x_6 \sin 2x_2 + k_2 (x_8 - z_4)) + (k_2 (x_4 - z_3) - x_8)) - T_4 (c_{34} (x_3 + x_4) + k_{34} x_8))\end{aligned}\quad (5)$$

Подставив (5) в (2), мы доопределили структуру первых двух многообразий:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= x_5 - \frac{1}{T_3 k_{12}} (J_2 T_3 (k_1 x_3 - k_1 z_2) + J_2 (k_1 x_2 - k_1 z_1 - x_6) - T_3 (c_{12} x_1 + c_{12} x_2 + k_{12} x_6)) = 0, \\ \psi_2 &= x_7 - \frac{1}{T_4 k_{34}} (J_4 (T_4 (\Delta J x_6 \sin 2x_2 + k_2 (x_8 - z_4)) + (k_2 (x_4 - z_3) - x_8)) - T_4 (c_{34} (x_3 + x_4) + k_{34} x_8)) = 0.\end{aligned}$$

Решая систему основных функциональных уравнений относительно макропараметров ψ_1 и ψ_2 , находим внешние управления u_1 и u_2 .

$$\begin{aligned}u_1 &= \frac{1}{J_2 T_1 T_3 k_{12}} (T_1 T_3 (J_1 J_2 c_{12} (x_6 - x_5) + J_1 c_{12} k_{12} x_1 - J_1 c_{12} k_{12} x_2 + J_2 a_1 k_{12} x_5) + J_1 J_2^2 (k_1 (x_2 - z_1 - T_1 (x_6 + z_2) + T_3 (x_6 - z_2))) + J_1 J_2 (T_3 k_{12} x_5 - T_1 c_{12} (x_1 + x_2)) + T_1 T_3 (J_2 (k_{12} (c_{12} (x_1 - x_2)))) - (J_1 k_{12}^2 (x_5 - x_6) + J_2 k_{12}^2 (x_5 - x_6)) + J_1 J_2 (T_1 k_{12} (x_5 + x_6) - T_1 c_{12} x_1 - T_3 c_{12} x_2 + T_2 c_{12} x_2 + T_3 k_{12} x_6 + T_1 T_3 c_{12} k_1 x_1) - J_1 J_2^2 x_6 + J_1 J_2 T_1 T_3 k_1 (c_{12} x_2 + k_{12} (x_5 - x_6))), \\ u_2 &= \frac{1}{J_2 J_4 T_2 T_4 k_{34}} (J_2 J_3 J_4 ((-J_4 (k_2 (x_8 + z_4)) (T_2 - T_4) + T_4 k_{34} x_7)) + (J_4 (x_8 - k_2 (x_4 + z_3))) k_{34} (T_2 (x_7 - x_8) - T_4 x_8) + c_{34} (x_3 - x_4) (T_4 + T_2) + T_2 T_4 + (J_3 \Delta J \sin 2x_2 (J_4 (k_{12} x_6 - c_{12} x_1)) - k_{34}^2 ((x_7 + x_8) (J_2 J_3 - J_2 J_4)) + J_2 k_{34} x_6) + J_2 J_4 (J_3 (k_2 (k_{34} x_8 - c_{34} (x_3 + x_4)) - x_6^2 \Delta J \cos 2x_2)) + J_3 (J_4 \Delta J \sin 2x_2 (c_{12} x_2 - k_{12} x_5) + J_2 c_{34} (J_4 (x_7 - x_8) - k_{34} (x_3 + x_4))) + J_2 J_4 T_4 (T_2 k_{34} (a_2 x_7 - c_{34} (x_3 + x_4)) - J_3 \Delta J \sin 2x_2 (T_2 x_6 (1 + k_2) - x_6)).\end{aligned}$$

B. Синтез наблюдателя

Синтез нелинейных систем значительно усложняется, когда не все переменные состояния объекта можно измерить и имеются недоступные измерению внешние воздействия. Решение задач управления такими объектами становится возможным с использованием наблюдателей.

Наблюдатель – алгоритм, вычисляющий оценки неизмеряемых величин на основе значений измеряемых величин, математической модели объекта управления и другой априорной информации. При синтезе наблюдателя используется методика синергетического синтеза асимптотических наблюдателей [12].

Синтез асимптотического наблюдателя заключается в получении алгоритма вычисления оценок ненаблюдаемых переменных z по значениям вектора наблюдаемых переменных x и вектора управления u , определенного в предыдущем разделе. Ненаблюдаемые переменные в данном случае z_2 и z_4 – переменные, характеризующие текущие значения коэффициента наклона соответствующей аппроксимирующей прямой.

Модель расширенной системы имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= g_0(x, u) + G_1(x)z \\ \dot{z} &= h_0(x, u) + H_1(x)z\end{aligned}$$

где x – вектор наблюдаемых переменных, размерность которого $n = 10$, u – вектор управляющих воздействий, размерностью m , z – вектор ненаблюдаемых переменных, размерность которого k .

На основании модели синтеза сформируем матрицы и вектора g_0 , h_0 , G_1 , H_1 . Количество наблюдаемых переменных $n = 10$, ненаблюдаемых $k = 2$. Вектор g_0 формируется на основании наблюдаемых переменных в уравнениях для наблюдаемых, размерностью $n \times 1$.

$$g_0 = \begin{bmatrix} x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ \frac{u_1 - c_{12}(x_1 - x_2)}{J_1} - \frac{k_{12}(x_5 - x_6)}{J_1} - \frac{a_1 x_5}{J_1} \\ \frac{c_{12}(x_1 - x_2)}{J_2} + \frac{k_{12}(x_5 - x_6)}{J_2} \\ \frac{u_2 - c_{34}(x_3 - x_4)}{J_3} - \frac{k_{34}(x_7 - x_8)}{J_3} - \frac{a_2 x_7}{J_3} \\ \frac{c_{34}(x_3 - x_4)}{J_4} + \frac{k_{34}(x_7 - x_8)}{J_4} - \frac{x_6 \Delta J \sin 2x_2}{J_4} x_8 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Матрица G_1 формируется на основании ненаблюдаемых переменных в уравнениях для наблюдаемых переменных, размерностью $n \times k$.

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Вектор h_0 формируется на основании наблюдаемых переменных в уравнениях для ненаблюдаемых, размерностью $k \times 1$.

$$h_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Матрица H_1 формируется на основании ненаблюдаемых переменных в уравнениях для ненаблюдаемых переменных, размерностью $k \times k$.

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Исходя из условий устойчивости матрица $L(x)$ размерностью $k \times k$ задается так, чтобы обеспечивалось асимптотическое схождение ненаблюдаемых переменных и их оценок.

$$L = \begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Так как матрица G_1 неквадратная, то элементы матрицы $\Gamma(x)$ назначаются так, чтобы матричное уравнение $\Gamma(x) \cdot G_1(x) = H_1(x) - L(x)$. было справедливым.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Далее вычисляется интеграл матрицы $\Gamma(x)$ по вектору x .

$$\int_0^x \Gamma(x) dx = \begin{bmatrix} -l_1 x_9 \\ -l_2 x_{11} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Вектор оценок ненаблюдаемых переменных и уравнения асимптотического наблюдателя могут быть найдены из уравнений:

$$\dot{y} = L(x)y - L(x) \int_0^x \Gamma(x) dx - h_0(x, u) + \Gamma(x)g_0(x, u), \quad (13)$$

$$\hat{z} = \int_0^x \Gamma(x) dx - y$$

где y – вектор переменных наблюдателя, \hat{z} – вектор оценок ненаблюдаемых переменных.

Подставив (6)-(11) в (13) получим уравнения наблюдателя:

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} l_1^2 x_9 + l_1 y_1 \\ l_2^2 x_{11} + l_2 y_2 \end{bmatrix}$$

Аналогично уравнения оценок:

$$\hat{z} = \begin{bmatrix} -l_1 x_9 - y_1 \\ -l_2 x_{11} - y_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Итоговый закон управления получим путем замены в ранее синтезированном законе управления ненаблюдаемых переменных на полученные оценки (14).

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для анализа эффективности полученного закона управления было проведено моделирование замкнутой системы, параметры регулятора сведены в табл. 1.

При моделировании использовались параметры механической системы ОПУ ТИ-3.12м.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛЯТОРА

T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	k ₁	k ₂	l ₁	l ₂
0,001	0,001	0,001	0,001	-100	-100	-0,001	-0,001

Скорость работы телескопа в режиме слежения зависит от конкретной модели. Однако обычно телескопы могут работать в режиме слежения со скоростью до нескольких градусов в минуту.

Был установлен сигнал $g_1(t)=0,0005t$, далее сигнал был изменен на $g_1(t)=0,00087t$. На рис. 2 показан график изменения управляемой переменной от поступающего сигнала угломестной оси телескопа.

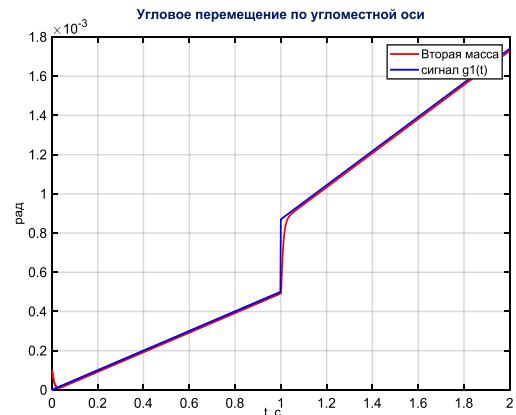


Рис. 2. Угловое перемещение второй массы и меняющийся линейный сигнал $g_1(t)$

Для второй оси был установлен сигнал $g_2(t)=0,00087t$, далее сигнал был изменен на $g_2(t)=-0,0005t$. На рис. 3 показан график изменения управляемой переменной от поступающего сигнала азимутальной оси телескопа.

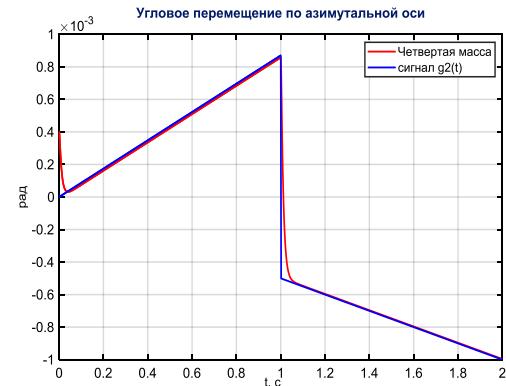


Рис. 3. Угловое перемещение второй массы и меняющийся линейный сигнал $g_2(t)$

По результатам моделирования можно сделать вывод, что происходит схождение управляемых переменных с задаваемыми сигналами, что свидетельствует о работоспособности синтезированного векторного следящего регулятора.

A. Моделирование системы управления с гармоническим сигналом

Регулятор предназначен для обработки линейных сигналов, демонстрируя эффективность в этом аспекте.

Однако, в случае необходимости, он также способен обрабатывать гармонические сигналы, обеспечивая при этом удовлетворительное качество работы. Это делает регулятор более универсальным и гибким.

Для обеих осей использованы сигналы вида: $g=A_c \cdot \cos(w_c \cdot t) A_s \cdot \sin(w_s \cdot t)$. Параметры сигналов сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. ПАРАМЕТРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

	A _c	A _s	w _c	w _s
g ₁ (t)	2	0,15	2	3
g ₂ (t)	0,8	0,3	3	2

Результат моделирования для угломестной оси на рис. 4.



Рис. 4. Угловое перемещение второй массы и гармонический сигнал $g_1(t)$

Результат моделирования для азимутальной оси представлен на рис. 5.



Рис. 5. Угловое перемещение второй массы и гармонический сигнал $g_2(t)$

Убеждаемся в сходжении управляемых переменных с подаваемыми сигналами.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена задача синтеза следящего регулятора для системы управления опорно-поворотным устройством оптического телескопа. Предложена методика синергетического синтеза векторного следящего регулятора, который обеспечивает двухосное слежение.

Был синтезирован векторный следящий регулятор методом АКАР для четырехмассовой модели. Проведено моделирование замкнутой системы, результаты которого подтверждают работоспособность и эффективность синтезированного следящего регулятора как с линейным сигналом, так и с гармоническим.

Предложенный метод позволяет более эффективно управлять ОПУ телескопа. Таким образом, предложенная методика синергетического синтеза векторного следящего регулятора может быть успешно применена для управления опорно-поворотными устройствами оптических телескопов, обеспечивая высокую точность наведения и слежения за движущимися объектами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алмаз А.А. Следящий регулятор для системы управления опорно-поворотным устройством оптического телескопа: специальность 27.03.03" Системный анализ и управление": Выпускная квалификационная работа. – Таганрог: ЮФУ. 2024. – 82 с.
2. Абдуллин А.А. Разработка и исследование методов повышения точности следящих электроприводов с упругой нагрузкой: специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах)": дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014. – 230 с.
3. Демидова Г.Л. Разработка и исследование регуляторов с нечеткой логикой для следящих электроприводов оптико-механических комплексов: специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах)": Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016. – 211 с.
4. Толмачев В.А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 6. – С. 68–72.
5. Исупов А.Н., Исупов К.С. Определение амплитудно-частотных характеристик альт-азимутального опорно-поворотного устройства крупногабаритного наземного телескопа // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 6. – С. 38–47.
6. Абдуллин А.А., Толмачев В.А. Система управления следящего электропривода с не僵硬执行器轴 // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 1. – С. 41–45.
7. Демидова Г.Л., Ловин С.Ю., Цветкова М.Х. Синтез следящего электропривода азимутальной оси телескопа с эталонной моделью в контуре положения // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 2. – С. 2–6.
8. Ильина А.Г. Моделирование в MATLAB автоматической системы управления вентильного электропривода азимутальной оси телескопа // Новые программные и технические средства автоматизированного электропривода. – 2010. – № 5. – С. 97–103.
9. Толмачев В.А., Никитина М.В. Сергеевна М.Е. Синтез системы управления электропривода азимутальной оси алтайского телескопа ТИ-3.12 // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – № 69. – С. 39–43.
10. Попов А.Н. Синергетический синтез следящих регуляторов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 7 (201). – С. 220–231.
11. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М: Энергоатомиздат, 1994.
12. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. Ч. 2. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 344 с.
13. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 7–27.
14. Патент № 2449330 Российской Федерации, МПК G02B 23/16 (2006.01). Перебазируемый телескоп с защитным укрытием: № 2017105030: заявл. 19.04.2011: опубл. 27.04.2012 / Здор Станислав Евгеньевич, Колинько Валерий Иванович. – 13 с.
15. Патент № 2572218 Российской Федерации, МПК G02B 23/16 (2006.01). Опорно-поворотное устройство преимущественно телескопа: № 2014127244: заявл. 03.07.2014: опубл. 03.07.2014 / Потапов Владимир Фёдорович, Тружеников Владимир Алексеевич, Зайцев Брис Иванович, Сальников Леонид Сергеевич, Соболева Галина Александровна, Шаргородский Владимир Данилович, Гришин Евгений Алексеевич. – 22 с.

Решение проблемы планирования и прогнозирования технического состояния транспорта специального назначения

Колмакова Дарья Андреевна
 Санкт-Петербургский горный университет
 императрицы Екатерины II,
 Санкт-Петербург, Россия
kolmakova2011@mail.ru

Яромич Елизавета Андреевна
 Санкт-Петербургский горный университет
 императрицы Екатерины II,
 Санкт-Петербург, Россия
lizavetayaromich@ya.ru

Аннотация. В статье описан подход к решению проблемы предиктивного обслуживания транспорта специальному назначению с помощью создания цифрового двойника. Внедрение цифрового двойника позволит диагностировать и прогнозировать состояние транспорта в режиме реального времени, что необходимо в условиях опасных и экстремальных климатических и производственных условий. В статье представлены результаты анализа существующих информационных систем для планирования работы и состояния транспорта, а также результаты разработки концептуальной модели технического состояния транспорта, что позволило определить параметры для построения математической модели цифрового двойника.

Annotation. At the enterprises owning a fleet of specialized equipment for maintenance of installations for oil production the problems on planning of maintenance and forecasting of further condition of transport, and also on purchase of necessary parts for repair are revealed. The article presents the analysis of programs presented on the market with similar functionality in comparison with the developed program, a conceptual model of the structure of the enterprise and interactions between departments, as well as thanks to the conducted survey at the enterprise was able to identify the most important parameters of the vehicle requiring more attention.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание транспорта, цифровой двойник, компьютерное моделирование.

Keywords: vehicle, life cycle, technical condition, computer programs.

I. ВВЕДЕНИЕ

В эру цифровизации предприятия стали чаще внедрять новые технологии для улучшения работоспособности, качества работы и изделий, и сокращения финансовых издержек.

Интеллектуальные системы управления сегодня являются перспективным направлением научных исследований, поскольку широко используются для решения технических задач в сложных условиях.

Совершенствование технологического процесса невозможно без предварительного математического описания объекта, которое позволяет выбрать оптимальное решение, поскольку описывает свойства, характеристики, учет которых позволяет снизить издержки производства.

В статье [1] предлагается решение проблемы прогнозирования состояния транспорта специального назначения с помощью внедрение технологии цифрового двойника.

Под термином «цифровой двойник» понимается цифровая модель, которая полностью воспроизводит форму и функционал оригинала. Она используется для моделирования процессов в различных условиях, что позволяет предсказать будущее транспортного средства или его важной составляющей. Это позволяет сэкономить время и денежные средства, избежать катастрофических ошибок, которые причиняют ущерб людям и окружающей среде, так как работа по обслуживанию нефтяных установок является зоной повышенной опасности.

Проблема травматизма на производстве в России остается важной и актуальной. Количество работников, которые погибли или пострадали в процессе выполнения своих обязанностей, продолжает увеличиваться.

Согласно информации Социального фонда России, в 2023 году на предприятиях трудилось приблизительно 48 миллионов человек, из которых около 7 миллионов подвергались воздействию опасных и вредных факторов. Ежедневно эти работники подвергались риску получения травмы, тяжелого заболевания или даже более серьезных последствий. Ответственность за сохранение жизни и здоровья сотрудников лежит на работодателях, которые должны обеспечить соблюдение правил безопасности и предоставить средства индивидуальной защиты. Федеральная служба по труду и занятости и государственные инспекции труда также играют важную роль в обеспечении безопасности на рабочем месте [2].



Рис. 1. Распределение случаев травматизма по видам работы в 2023 году [<https://sr2023.normickel.ru/occupational-health-safety/occupational-injuries>]

На рис. 2 представлены данные по статистике случаев смертельного травматизма [3].

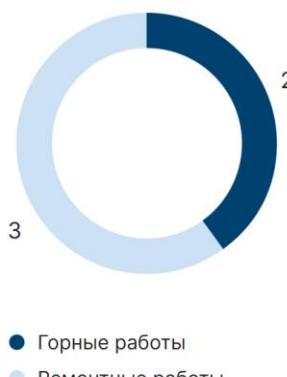


Рис. 2. Распределение случаев смертельного травматизма по видам работы в 2023 году [<https://sr2023.norgnickel.ru/occupational-health-safety/occupational-injuries>]

Таким образом, можно сделать вывод, что ремонтные работы являются зоной, повышенной опасности.

В данный момент, активно осуществляется внедрение цифровых двойников в различные процессы предприятий в разных областях, поскольку это позволяет значительно сократить издержки.

Мировые эксперты замечают стремительное развитие цифровой эпохи, которая проникает во все сферы нашей жизни.

Физический и цифровой мир объединяется благодаря цифровым близнецам через программное обеспечение и взаимодействия различных датчиков (оборудования), что позволяет анализировать поведение, путем создания математической модели фактического объекта или процесса.

Изменения цифровой модели в реальном масштабе времени позволяет находиться в таком же состоянии, что и рабочий объект, что позволяет оптимизировать работу оборудования и предотвратить поломки и аварии [4].

В Российской Федерации уже существуют предприятия, такие как ПАО «Газпром», которые разрабатывают «цифровые двойники» для производственных процессов [5].

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В рамках работы был проведен анализ используемых программ на предприятиях в сравнении с разрабатываемой программой, аналогичного назначения, основные из которых представлены в табл. 1.

Анализ проводился путем сравнения перечня показателей. Были выписаны функциональные возможности каждой программы, составлена таблица, которая отображает схожесть и расхождение программ.

Результаты проведенного анализа программного обеспечения, например, «1С: Управление автотранспортом», показали ограниченный перечень параметров транспорта в учетных задачах (табл. 1) и проблематичность инструментального мониторинга транспорта (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕТНЫХ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ 1С
[составлена авторами]

№ п/п	Наименование параметра
1	Гаражный и государственный номер
2	Номер двигателя, шасси, кузова, VIN, цвет
3	Габаритные и полезные размеры
4	Собственный вес и грузоподъемность
5	Количество осей и колес
6	Транспортное средство
7	Тип двигателя и мощность
8	Вид топлива и нормы расхода ГСМ
9	Нормы прохождения планового ТО
10	Выданные документы (полисы ОСАГО, сертификаты и т.д.)
11	Установленные шины, аккумуляторы, аптечки, рации и др.
12	Закрепленный экипаж

ТАБЛИЦА 2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ [составлена авторами]

Перечень функций	Реализация функций			
	1С: Управление автотранспортом [6]	АРМ механика [7]	Контроль и учет автотранспорта [8]	Агрегатор данных КМТ
Оформление заказов на ТС	Да	Нет	Нет	Да
Формирование суточной разнарядки и маршрутных листов	Да	Да	Нет	Да
Встроенные возможности спутникового мониторинга	Да	Нет	Нет	Да
Взаимодействие с внешними системами спутникового мониторинга	Да	Нет	Нет	Да
Настройка норм расхода ГСМ	Да	Да	Нет	Да
Учет поступления и выдачи ГСМ	Да	Да	Нет	Да
Учет масел и технологических жидкостей	Да	Да	Да	Да
Учет карточек ТС	Да	Да	Да	Да
Учет установленных шин, аккумуляторов, аптечек и произвольного оборудования	Да	Да	Да	Да
Контроль окончания сроков действия документов, выданных на водителей и ТС (мед. справки, полисы ОСАГО и др.)	Да	Да	Да	Да
Ведение прейскурантов и тарифов на транспортные услуги	Да	Нет	Нет	Да
Журнал замены узлов и агрегатов	-	Да	Да	Да
Формирование счетов и актов	Да	Да	Да	Да
Формирование таблицы учета рабочего времени	Да	Да	Да	Да
Формирование графиков проведения техосмотра	Нет	Да	Нет	Да
Ведение справочников	Нет	Да	Нет	Да
Учет пробега ТС	Нет	Да	Да	Да
Учет ДТП	Нет	Да	Нет	Да
Текущее состояние узлов ТС	Нет	Нет	Нет	Да
Текущее состояние работы агрегатов	Нет	Нет	Нет	Да
Создание цифрового двойника	Нет	Нет	Нет	Да

Результаты оценки программного обеспечения показали, что разработанный агрегатор данных лишен значительной части функциональных недостатков, что отображается на рис. 3, который представляет вектор комплексных показателей качества, и на рис. 4, в существенном выигрыше уровня интегрального показателя качества программного средства.



Рис. 3. Значения комплексных показателей качества программных средств по модели качества при использовании (ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010) [составлена авторами]

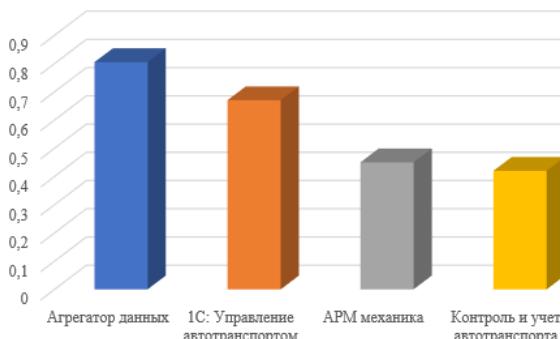


Рис. 4. Значения интегрального показателя качества программных средств по модели качества при использовании (ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010) [составлена авторами]

Оценка технического уровня разработанного программного обеспечения агрегатора данных показала, что по отношению к известным программным средствам показатели превышают ориентировочно на 10-15% [9].

Благодаря проведенному опросу на предприятии ЗАО «МеКамиНефть» удалось составить концептуальную модель структуры предприятия и взаимосвязи между подразделениями. Для опроса было выбрано три специалиста в должности: главный механик, механик ЦГНКТ и механик транспортной службы.

Опираясь на работу [10], был произведен расчет и построена диаграмма Парето, которая отсекла важные параметры, по которым были построены концептуальные модели.

Основным методом построения концептуальной модели является корреляционный анализ, позволяющий определить наиболее значимые переменные [11, 12].

Для построения такой модели был проведен опрос сотрудников нефтедобывающего предприятия, которым был выдан перечень параметров, где требовалось оценить от 1 до 10, что означало: 1-4 – параметр, не влияющий на существенные изменения; 5-8 – параметр, требующий отслеживания; 9-10 – параметр, который требует постоянного внимания.

В табл. 3 отображены параметры входящие в состав структуры предприятия:

ТАБЛИЦА 3 [составлена вторыми]

№	Оцениваемые параметры	Эксперты		
		1 эксперт	2 эксперт	3 эксперт
1	Хранение данных	8	7	7
2	Обработка данных	7	9	8
3	Передача данных	6	7	7
4	ТО	10	8	10
5	Заказ деталей	6	5	7
6	Ремонт техники	9	7	6
7	Поведение транспорта при различной температуре	2	3	2
8	Навигация между сотрудниками	7	5	10
9	Планирование закупки необходимых деталей	5	6	2
10	Финансовый фонд	6	7	9
11	Скорость решения проблемы	8	10	10
112	Не нанесение вреда окружающей среде	9	10	10
113	Отслеживание моточасов	10	8	10
114	Возврат сотрудника	2	2	3
15	Состояние транспорта, пришедшего на предприятие	6	3	3

На основании полученных оценок были проведены все необходимые расчеты: подсчитаны ранги, отклонение суммы рангов от средней арифметической суммы рангов и их квадрат, коэффициент конкордации, число связок, критерий согласованности Пирсона.

Ниже представлена диаграмма Парето (рис. 3), построенная по полученным расчетам, отображающая наиболее важные факторы, обозначенные службой эксплуатации специального транспорта.

Анализируя данную диаграмму, можно выделить наиболее важные факторы (расположенные над накопленной линией), на которые стоит обратить больше внимания при разработке (табл. 4).

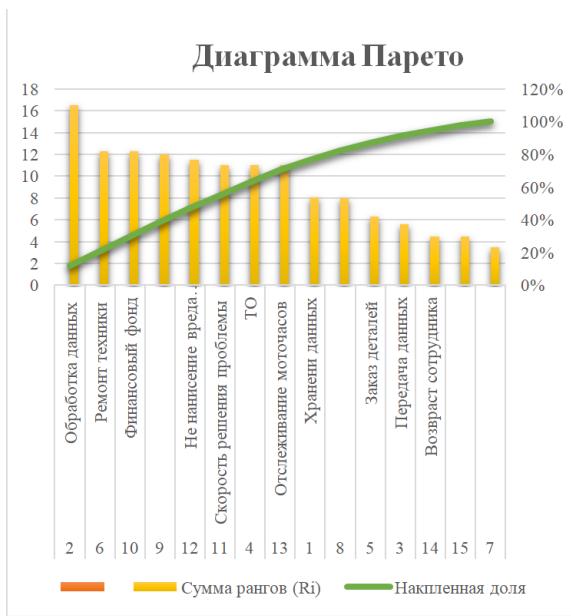


Рис. 5. Факторы входящие в состав предприятия [составлена авторами]

ТАБЛИЦА 5 [составлена авторами]

№	Диагностические параметры	Эксперты		
		1 эксперт	2 эксперт	3 эксперт
1	ДВС (бензин/дизель/биодизель)	9	10	10
2	Гидравлическая система	7	10	8
3	Топливный насос низкого/высокого давления	8	8	10
4	Освещение (фары)	6	7	4
5	Шасси	8	9	6
6	Марка, модель, год выпуска, государственный номер, VIN, код постановки на учет на предприятии	2	6	1
7	КПП/РК	7	8	10
8	Гидроусилитель руля	7	9	8
9	Система охлаждения	6	8	8
10	Передний/задний/средний мост(левый/правый)	8	8	6
11	Топливный бак	5	6	5
12	АКБ	5	8	5
13	Генератор	9	8	8
14	ЭБУ	6	8	10
15	КОМ	7	8	6
16	ПГУ	7	8	8
17	Цилиндр сцепления главный	6	7	8
18	Компрессор	5	8	10
19	Блок подготовки воздуха	4	8	10
20	Насос-форсунка	3	7	10
21	Фильтр грубой/тонкой очистки топлива	4	7	8
22	Главный тормозной цилиндр	8	8	8
23	Колесный тормозной цилиндр	5	8	8
24	Тормозные колодки	7	8	8
25	Освещение кабины	1	6	1
26	Аварийная сигнализация	1	7	5
27	Звуковая сигнализация	1	7	5
28	ПЖД	5	8	8

Эти параметры будут учитываться в создании цифрового двойника специального транспорта для прогнозирования дальнейшего состояния.

Наиболее важные параметры (табл. 5) будут строиться и прогнозироваться благодаря цифровому двойнику. На рис. 5 их показатели отображаются выше наклонной линии.

Для построения цифрового двойника используются 8 основных параметров (табл. 6).

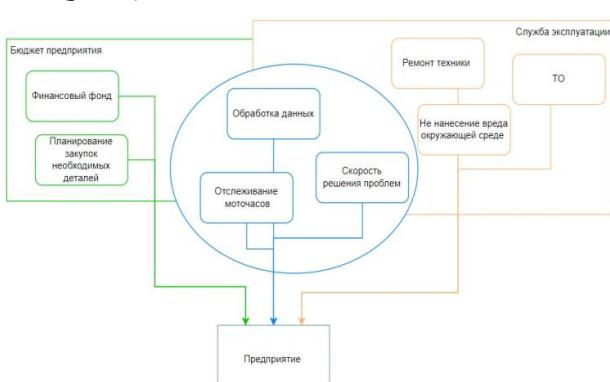


Рис. 6. Концептуальная модель предприятия [составлена авторами]

Таким образом, по данной концептуальной модели можно сделать вывод, что предприятие – это совокупность процессов отдельных и взаимосвязанных между собой.

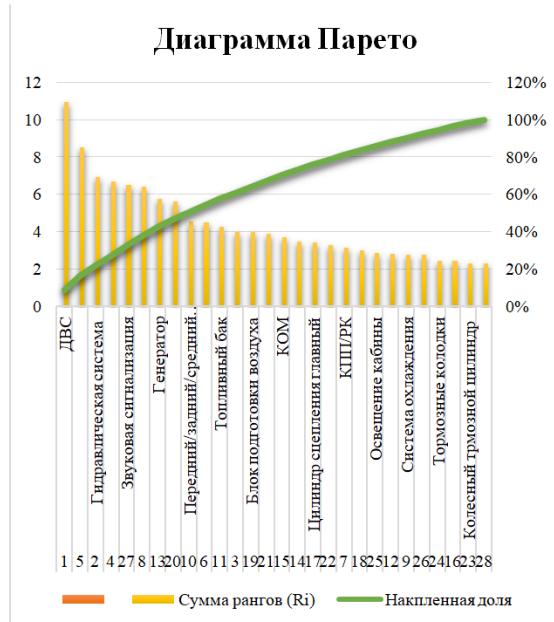


Рис. 7. Перечень параметров, участвующий в процессе изучения состояния специального транспорта [составлено авторами]

ТАБЛИЦА 6 [составлена авторами]

Название параметров	Порядковый № параметра	Сумма рангов (R _i)	Вес (λ_i)
ДВС	1	10,93	0,09
Шасси	5	8,50	0,07
Гидравлическая система	2	6,89	0,06
Освещение(фары)	4	6,67	0,05
Звуковая сигнализация	27	6,50	0,05
Гидроусилитель руля	8	6,39	0,05
Генератор	13	5,76	0,05
Насос-форсунка	20	5,60	0,05

Данные параметры были выбраны путем построения диаграммы Парето, которая отобразила, что это самые важные параметры в отслеживание состояния транспортного средства.

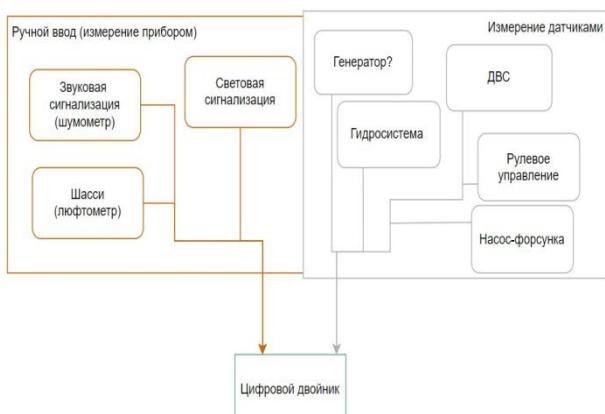


Рис. 8. Концептуальная модель получения данных о транспортном средстве для построения цифрового двойника [составлено авторами]

Благодаря проведенным работам, стоит заметить, что предприятие – это живой организм, отделы которого функционируют между собой. Исследуя данные проблемы, было замечено, что их возникновения происходит из-за обработки данных. Поскольку информация, полученная в ходе контроля за техническим состоянием

транспортных средств, аккумулируется на бумажных носителях (журналы, отчеты и т.д.), заносится операторами в информационные системы предприятия (например, в «1С: Управление автотранспортом»), либо теряется.

Неправильная обработка данных или ее потеря несет за собой проблему по своевременному оказанию технического обслуживания и ремонта транспорта.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание новой программы, которая в режиме реального времени обеспечивает работу по сбору, обработке и хранению значительной номенклатуры учетных данных о специальных транспортных средствах предприятия, и, в частности, их техническом состоянии, является актуальным.

Такая программа позволит своевременно отслеживать показатели, что поможет спланировать необходимый ремонт или технический осмотр. Благодаря программе, предприятие сократят производственные издержки на 10-15% заранее планируя закупку необходимых деталей, отсутствие которых приводит к простою транспортного средства. Технология цифрового двойника, позволяющая проектировать ситуации произошедших поломок поможет сократить травматизм на предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20, № 6. – С. 815–824.
 2. Производственный травматизм: статистика, меры профилактики [Электронный ресурс]. – URL: <https://indpages.ru/safe/proezevodstvystvennyiy-travmatizem/?ysclid=lxkb0z06gv41274156>.
 3. Производственный травматизм – Охрана труда и промышленная безопасность – Отчет об устойчивом развитии ПАО «ГМК «Норильский никель» за 2023 г. [Электронный ресурс]. – URL: <https://sr2023.nornickel.ru/occupational-health-safety/occupational-injuries>.
 4. Цифровая Россия/РБК [Электронный ресурс]. – URL: <https://digital-russia.rbc.ru/articles/dva-v-odnom-dlya-chego-zavodunuzhen-tsifrovoy-bliznets/>.
 5. Диджитализация [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldsellers.ru/didzhitalizacija/>.
 6. <https://solutions.lc.ru/catalog/autotransport-standart/features?ysclid=lxvhpwve8t15372142>.
 7. <https://help.astral.ru/1cep/oproektnoe-reshenie-1s-epd/rabota-s-arm/arm-mehanika-to?ysclid=lxvhv8xhsf425783181>.
 8. <https://www.avto-uchet.ru/?ysclid=lxvv7z8mm1304441351>.
 9. Колмакова Д.А., Плетнев Я.А., Шестаков А.В. Требования к агрегатору данных корпоративного мониторинга транспорта // Программа и порядок проведения: Всероссийская научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики» (ПКМ-2021) 30 ноября – 2 декабря 2021. – СПб.: СПбГУТ, 2021. – С. 27.
 10. Ильюшин Ю.В., Капости Е.И. Разработка комплексной математической модели производства алюминия в электролизере Содерberга. Энергия 2023, 16, 6313. – <https://doi.org/10.3390/en16176313>.
 11. Афанасьева О., Безюков О., Перухин Д., Тукеев Д. Метод обработки результатов экспериментальных исследований вибрационной активности судовых дизелей, вызванной работой цилиндрово-поршневой группы. –<https://doi.org/10.3390-inventions8030071>.
 12. Афанасьев М.П. Моделирование проточной части центробежного компрессора двигателя внутреннего сгорания для определения зон эффективного отвода неиспаренной влаги при испарительном охлаждении наддувочного воздуха // Серия конференций ИОР: Наука о Земле и окружающей среде.2020, 459,1,022053. – DOI: 10.1088/1755-4592/022053.
 13. Интеллектуальные транспортные системы [Электронный ресурс]. – URL: <https://trasscom.ru/blog/intellektualnye-transportnye-sistemy/>.

Секция II

ИНТЕЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI: 10.18522/syssyn-2024-16

Генетические алгоритмы: проблемы и перспективы

Гладков Леонид Анатольевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
email lagladkov@sedu.ru

Гладкова Надежда Викторовна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
email nvgladkova@sedu.ru

Аннотация. Описаны преимущества генетических алгоритмов перед другими методами оптимизации. Приведена структура генетического алгоритма и последовательность поиска новых решений. Рассмотрены вопросы повышения эффективности управления процессом эволюционного поиска. Приведено определение нечеткого генетического алгоритма. Описана структура нечеткого логического контроллера. Приведена процедура выполнения нечеткого генетического алгоритма. Отмечены достоинства и недостатки аддитивных нечетких алгоритмов.

Abstract. The advantages of genetic algorithms over other optimization methods are described. The structure of the genetic algorithm and the sequence of searching for new solutions are given. The issues of increasing the efficiency of managing the evolutionary search process are considered. The definition of a fuzzy genetic algorithm is given. The structure of a fuzzy logical controller is described. The procedure for executing a fuzzy genetic algorithm is given. The advantages and disadvantages of adaptive fuzzy algorithms are noted.

Ключевые слова: генетические алгоритмы, эволюционное моделирование, нечеткий генетический алгоритм, нечеткое управление, управляющие параметры.

Keywords: genetic algorithms, evolutionary modeling, fuzzy genetic algorithm, fuzzy control, control parameters.

I. ВВЕДЕНИЕ

Оглядываясь назад в попытке найти точку отсчета и оценить историю возникновения и развития научного направления «эволюционные (генетические) алгоритмы» нельзя не отметить Алана Тьюринга, который в 1950 году в своей книге «Вычислительные машины и разум» [1] предвосхитил появление эволюционных вычислений и обучения с подкреплением. Тьюринг отмечал, что «существует очевидная связь» между процессом обучения вычислительной машины и эволюцией, и эта связь, по его мнению, прослеживается в «следующих отождествлениях»:

- структура «машины» – наследственность;
- изменения – мутации;
- естественный отбор – суждение экспериментатора».

Тьюринг также считал, что «наш процесс обучения будет более быстрым, чем эволюция человека. Выживание наиболее приспособленных весьма медленный способ выявления преимуществ...»

История применения различных эволюционных алгоритмов восходит к началу 1950-х годов, когда около десятка разных ученых, независимо друг от друга опубликовали различные варианты подобных алгоритмов, при этом каждая процедура немного отличалась от других.

Но все же основные работы, заложившие основы эволюционных алгоритмов были опубликованы в 60-70-х годах XX-го века. И здесь среди целой плеяды выдающихся ученых нужно отметить Джона Холланда, который не только опубликовал в 1975 году свою книгу «Адаптация в естественных и искусственных системах» [2], которая дала начало новому направлению исследований, но и создал признанную научную школу в области генетических алгоритмов (ГА). Его ученики – Кеннет де Йонг и Дэвид Голдберг внесли значительный вклад в развитие теории эволюционного моделирования. Так, де Йонг предложил 5 различных видов тестовых функций, выбранных им для оценки качества генетического алгоритма. Используя эти тестовые функции и предложенные им метрики качества, которые до сих пор используются многими исследователями, Де Йонг впервые провел анализ влияния 4-х базовых параметров (размер популяции, вероятность кроссинговера, вероятность мутации, число поколений) на эффективность работы ГА. В свою очередь Голдберг ввел понятие «строительных блоков» и эволюционного проектирования. Он также является автором одной из самых цитируемых книг по генетическим алгоритмам "Генетические алгоритмы в задачах поиска, оптимизации и машинного обучения"

[3]. Появление этой книги, содержащей не только обзор работ в области ГА на момент её издания, но и анализ перспективных направлений исследований, с примерами программной реализации ГА для решения конкретных прикладных задач, способствовало значительному росту интереса исследователей к проблематике.

К концу 1960-х сложилась определенная градация, в рамках которой выделяли такие направления, как генетические алгоритмы, эволюционные стратегии или эволюционное программирование. Со временем появились более специализированные методы, которые были связаны с конкретными структурами данных, такими как системы классификаторов и генетическое программирование. В настоящее время можно дополнить этот список новыми направлениями: искусственная жизнь, параллельные ГА, биоинспирированные и роевые алгоритмы.

По мере роста интереса к эволюционным алгоритмам идеи различных направлений заимствовались, обменивались и модифицировались во всех этих подходах, что привело к стиранию различий между ними. Исходя из текущего уровня развития научной мысли, можно использовать термин "эволюционный алгоритм" для описания любого из алгоритмов, использующих случайные вариации и отбор на основе популяции.

II. ПРОСТОЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

В основе генетического алгоритма лежит модель эволюции Ч. Дарвина. Ее движущими силами являются [4]:

- неопределенная изменчивость – наследственно обусловленное разнообразие популяции;
- борьба за существование, в ходе которой устремляются менее приспособленные индивиды;
- естественный отбор – выживание наиболее приспособленных особей.

Холланд предложил алгоритм известный как «упрощенный репродуктивный план» [2]. Его можно представить в следующем виде:

1. Создание начальной популяции. Вычисление значений функции приспособленности каждой хромосомы и среднего значения приспособленности всей популяции.

2. Случайный выбор двух родителей для реализации оператора кроссинговера пропорционально значению функции их приспособленности.

3. С заданной вероятностью производится кроссинговер над выбранными хромосомами. Далее с вероятностью 0,5 выбирается один из потомков $P_i(t)$ и сохраняется в новой популяции. К потомкам последовательно применяется оператор инверсии, а затем мутации с заданными вероятностями. Полученный генотип потомка сохраняется.

4. Производится редукция (сокращение) размера новой популяции, чтобы ее размер оставался постоянным.

5. Производится определение значений функции приспособленности новых членов популяции и пересчет средней приспособленности всей новой популяции.

6. Если условие останова алгоритма выполнено, то переход к п. 7, если нет, то переход к п. 2.

7. Конец работы.

Простой генетический алгоритм (ПГА) был предложен Д. Гольдбергом [3] на основе работ Д. Холланда. Его механизм несложен. Случайным образом генерируется начальная популяция, затем производится копирование последовательности хромосом и перестановка их частей. Далее ПГА реализует множество простых операций к начальной популяции и генерирует новые решения. ПГА Гольдберга состоит из трех операторов: репродукция; кроссинговер; мутация.

Основными преимуществами генетических алгоритмов по сравнению с другими методами оптимизации являются:

1. Отказ от обработки только одного решения и использование конкуренции в качестве инструмента оптимизации. То есть в ходе эволюции мы моделируем процесс конкуренции и отбора. В каждом поколении особи соревнуются – либо только между собой, либо также со своими родителями – за попадание в следующее поколение. Это приводит к тому, что после серии итераций мы наблюдаем улучшение качества решения и сходимость к окрестности квазиоптимального решения. Также мы можем использовать случайные вариации для поиска новых решений, подобно естественной эволюции.

2. Возможность работы не с одним, а с множеством закодированных параметров (решений). Мы начинаем с совокупности начальных решений, возможно, генерированных путем случайной выборки на пространстве поиска S .

3. Использование значения функции пригодности для оценки качества получаемых решений. Функцию пригодности можно использовать для определения относительной ценности каждого из решений. Это не всегда просто, потому, что необходимо выбрать правильный критерий оценки. Выбранная функция должна, по крайней мере, иметь возможность ранжировать одно решение относительно другого. Те решения, которые имеют лучшее значение функции пригодности, становятся родителями для следующего поколения потомков.

4. Генерация потомков. При применении генетического алгоритма мы исследуем не только окрестности каждого отдельного решения. Мы можем исследовать окрестности пар решений. То есть мы можем использовать более одного родительского решения для создания нового решения-кандидата. Один из способов сделать это – взять части двух родителей и соединить их вместе, чтобы сформировать потомство. Мы можем также смешивать параметры родителей, получая, новое средневзвешенное по компонентам решение. Уместность применения того или иного оператора поиска определяется спецификой решаемой задачи.

5. Также имеется возможность использовать в процессе поиска вероятностные правила.

III. УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ГА

Генетические алгоритмы, как и большинство других оптимизационных алгоритмов требуют настройки некоторых параметров [5]. К таким параметрам относятся: размер популяции, вероятность (частота) выполнения различных операторов, параметр, регулирующий избирательное давление системы, различные штрафные коэффициенты (если для решения задачи оптимизации с ограничениями ис-

пользуется подход с использованием штрафной функции), а также размер шага мутация, количество точек пересечения и т.д. Значения таких параметров могут определять, будет ли алгоритм находить решение, близкое к оптимальному, и, что также важно, будет ли он эффективно находить разумное решение. Однако выбор эффективных значений параметров является трудоемкой задачей, и значительные усилия затрачиваются на разработку хороших эвристик для различных задач.

Большое количество настраиваемых параметров – это одновременно дополнительные возможности в смысле повышения устойчивости к решению разного вида задач и дополнительные затраты для человека, который разрабатывает эти алгоритмы.

Разработчик должен учитывать множество аспектов: (1) представление (методика кодирования), (2) функция оценки пригодности, (3) выбор генетических операторов, (4) подбор размера популяции, (5) задание критерия остановки и так далее [6]. Значительные усилия, затрачиваемые на поиск оптимальных значений настроек параметров, в некоторых случаях увенчались успехом, но в целом поиск волшебного набора значений параметров, который даст наилучшие возможные результаты, является бесперспективным.

Использование метода проб и ошибок для поиска полезных значений параметров отнимает слишком много времени. Было бы неплохо, если бы существовала теория, которая указывала бы, как устанавливать некоторые параметры эволюционных алгоритмов. В некоторых случаях такая теория действительно существует, но число этих случаев невелико.

Поэтому актуальной является задача нахождения какого-нибудь автоматизированного способа оптимизации параметров, управляющих эволюционным поиском.

Настройка параметров вручную сопряжена с проблемами [7]. Как правило, одновременно настраивается только один параметр, что может привести к неоптимальному выбору, поскольку параметры взаимодействуют сложным образом. Одновременная же настройка большего количества параметров приводит к необходимости проводить огромное количество экспериментов.

Другой вариант выбора подходящих настроек параметров для эволюционного алгоритма состоит в использовании аналогий между решаемой задачей и известной, ранее решенной: *то, что сработало у них, сработает и у нас*. При этом неясно, как измерить сходство между проблемами, чтобы иметь хоть какое-то представление о том, существует ли какая-либо аналогия между двумя проблемами или методами их решения. Как показывает практика, для генетических алгоритмов этот подход, как правило, не работает. То есть мы не можем ориентироваться на то, что какой-то набор параметров хорошо сработал у кого-то другого в конкретной задаче. Не факт, что эти же самые значения параметров будут также хорошо работать в нашей задаче.

Альтернативой настройке параметров генетического алгоритма вручную или на основе аналогии является использование математического анализа. Например, в свое время, Рехенберг [8] проводил исследования свойств генетических алгоритмов. В качестве компро-

мисса он предложил так называемое правило «1/5 - одна пятая»: если частота генерации решений, имеющих значение функции пригодности лучше родительского, превышает одну пятую, то необходимо увеличить величину стандартного отклонения, а если меньше, то – уменьшить. Логика в данном случае проста. Если алгоритм производит слишком много улучшенных потомков, значит, он действует слишком консервативно и делает слишком маленькие шаги. Если же число «успешных» решений составляет менее одной пятой, поиск ведется слишком агрессивно и нужно уменьшить размер шага. На основе проведенного анализа Рехенберг [8] предложил интерактивную процедуру адаптации величины стандартного отклонения для максимального улучшения показателей алгоритма.

Однако и эта процедура работает только с ограниченным набором функций, которые изучал Рехенберг.

Можно однако вспомнить, что любой процесс эволюции является по своей сути динамичным, адаптивным процессом и этой точки зрения очевидно, что на разных стадиях эволюционного процесса могут быть оптимальными различные значения параметров. Это справедливо, поскольку популяция меняет свой состав в каждом поколении. То, что работает для одного поколения и одной композиции, не обязательно должно работать для любого другого поколения и композиции. Использование статических параметров само по себе может привести к снижению производительности.

Самый простой способ преодолеть эту проблему – использовать параметры, значения которых меняются со временем, то есть заменить параметр p функцией $p(t)$, где t – счетчик поколения, но задача нахождения оптимальной функции $p(t)$ может быть довольно сложной.

Недостатком этого подхода является то, что если значение параметра $p(t)$ изменяется исключительно в зависимости от времени t , без учета фактического прогресса, достигнутого в решении задачи, то может возникнуть разрыв между алгоритмом и задачей. Тем не менее, известно достаточно много примеров, когда удавалось улучшить качество результатов, возвращаемых алгоритмами при использовании простых детерминированных правил для изменения параметров. Можно утверждать, что даже неоптимальный выбор $p(t)$ часто может привести к лучшим результатам, чем неоптимальный выбор p .

Итак, поиск оптимальных значений параметров для эволюционного алгоритма является плохо структурированной, нечетко определенной и сложной задачей. Но это задачи, для решения которых и разрабатывались эволюционные алгоритмы. Исходя из этого, логично предположить, что эволюционный алгоритм можно использовать не только для поиска решений, но и для настройки параметров такого же алгоритма. Задача, в данном случае, сводится к изменению значений параметров во время выполнения алгоритма с учетом фактического процесса поиска. Для ее решения можно использовать какое-либо эвристическое правило, которое имеет обратную связь с текущим состоянием поиска и соответствующим образом изменяет значения параметров, либо можно включить параметры в структуру данных, пред-

ставляющую решение, тем самым делая эти параметры подверженными эволюции вместе с самим решением.

Все методы изменения значений управляющего параметра можно отнести к одной из трех категорий [5]:

- Детерминированное управление параметрами, когда значение управляющего параметра изменяется по некоторому детерминированному правилу без использования какой-либо обратной связи от поиска. Часто используется изменяющийся во времени график, когда правило применяется через заданное количество поколений.
- Адаптивное управление параметрами, когда имеется некоторая форма обратной связи с поиском, которая используется для определения направления и/или величины изменения управляющего параметра. Управляющему параметру может быть присвоено некое условное значение (кредит), а уже в процессе выполнения эволюционного алгоритма определяется, сохранится ли новое значение.
- Управление параметрами на основе самоадаптации, в основе которого лежит идея эволюции «эволюции». При этом параметры, подлежащие адаптации, кодируются в структуре данных индивидуума и подвергаются изменению (мутации и рекомбинации). "Лучшие" значения этих закодированных особей с большей вероятностью выживут и произведут потомство и, следовательно, распространят эти "лучшие" значения параметров.

Можно выделить несколько перспективных направлений исследований, связанных с управлением параметрами в эволюционных алгоритмах, в том числе:

- Разработка и сравнения алгоритмов с адаптивными механизмами и без них, в том числе в стационарных и динамических средах.
- Оценка полезности изменения значений параметров, а также поведения алгоритма, которое является результатом их взаимодействия с использованием простых детерминированных правил управления. Например, сравнение эволюционных алгоритмов с постоянным и переменным размером популяции, при условии, что общее количество вычислений функций в обоих алгоритмах остается одинаковым.
- Исследование различных эвристик адаптивного управления.
- Исследование условий, при которых работает адаптивное управление. Известны, например, некоторые рекомендации по подбору размера шага самоадаптивной мутации, касающиеся количества потомков одного родителя, но никто не проводил никаких исследований того, насколько эти или другие рекомендации являются правильными и полезными.
- Исследование достоинств и недостатков самоадаптации нескольких (возможно, всех) параметров эволюционного алгоритма.

- Разработка формальной математической основы построения таксономии для управления параметрами в эволюционных алгоритмах.

IV. НЕЧЕТКИЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Особый интерес в последнее вызывают различные гибриды, в том числе приложения, сочетающие нечеткую логику (НЛ) и генетические алгоритмы (ГА) [9].

Интеграция НЛ и ГА может выполняться на основе одного из двух следующих подходов [10]:

- 1) применение ГА в задачах оптимизации и поиска, связанных с нечеткими системами;
- 2) использование нечетких инструментов или методов, основанных на нечеткой логике, для моделирования различных компонентов ГА или адаптации параметров управления ГА с целью повышения его производительности.

Генетический алгоритм второго типа, как правило, называется нечетким генетическим алгоритмом (НГА).

Для эффективной организации НГА необходимо решить различные проблемы, свойственные генетическим алгоритмам [9]:

- Разработка методики кодирования решений. Классическое бинарное представление (гены со значениями ноль или единица) может быть преобразовано в нечеткое представление (гены со значениями от нуля до единицы), чтобы отобразить более сложные соотношения генотипа и фенотипа, аналогичные тем, которые встречаются в природе.
- Подбор операторов кроссинговера. Нечеткие связи и треугольные распределения вероятностей могут быть использованы для разработки мощных операторов кроссинговера, которые регулируют адекватные уровни разнообразия популяции и решают проблему преждевременной сходимости.
- Выбор критериев останова алгоритма. Меры доверия и оценки неопределенности могут использоваться при обработке прогнозов решений, для достижения оптимальных решений с заданной точностью, а также снижать скорость и размер шага выполнения по мере достижения установленного критерия.
- Адаптация параметров управления ГА. Контроллеры с нечеткой логикой могут использоваться для динамического вычисления значений параметров управления ГА с использованием опыта и знаний экспертов, чтобы обеспечить подходящий баланс между задачами эксплуатации имеющихся областей и нахождения (исследования) новых областей на протяжении всего цикла выполнения ГА, чтобы избежать проблемы преждевременной сходимости.

Нечеткий алгоритм, по определению Л. Заде [11] представляет собой упорядоченную последовательность инструкций, в которой некоторые из инструкций могут содержать метки нечетких множеств, например:

Слегка уменьшите значение x, если значение у велико

Увеличьте значение x очень незначительно, если значение у не очень большое и не очень маленькое

Согласно классическому определению нечеткого алгоритма – это адаптивный ГА, с использованием систем, основанных на нечетких правилах, для управления параметрами управления ГА с целью их динамической настройки с использованием системы нечеткого вывода для управления базой нечетких правил. Основная идея нечеткого ГА состоит в использовании нечеткого логического контроллера (НЛК) [12], входными данными для которого служит любая комбинация показателей производительности ГА или текущих параметров управления, а выходными – значения параметров управления ГА. Текущие показатели производительности ГА отправляются в НЛК, которые вычисляют новые значения управляющих параметров, которые будут использоваться ГА.

В составе НЛК можно выделить следующие блоки [9]: база знаний, включающая в себя базу правил и базу данных; блок фазификации; блок дефазификации; система вывода решения; система контроля.

Обобщенная структура НЛК представлена на рис. 1.

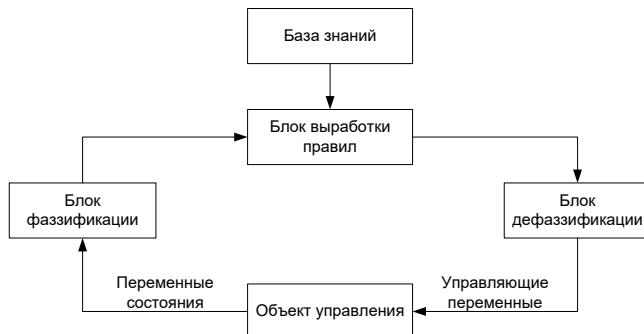


Рис. 1. Обобщенная структура нечеткого логического контроллера

В общем виде схему работу НЛК можно описать следующим образом. НЛК использует знания экспертов в форме лингвистических правил контроля. Система выработки правил на основе знаний экспертов и используя рассуждения, делает определенный вывод, который после дефазификации, превращается из нечеткого правила в реальное воздействие на параметры алгоритма. Изменение параметров алгоритма влечет за собой изменение процесса поиска и текущих результатов, которые затем в блоке фазификации из переменных состояния преобразуются в нечеткие множества.

В качестве исходных данных для НЛК используются различные величины [9]. Наиболее распространенным выбором являются показатели, характеризующие степень разнообразия решений в популяции: генотипического и фенотипического разнообразия. Первый показатель определяет количество разнообразных вариантов решений в популяции, а второй – качество этого разнообразия. Первый из них – это показатель генотипического разнообразия (*GD*), основанный на евклидовом расстоянии между хромосомами в популяции. Его можно записать следующим образом:

$$GD = \frac{\bar{d} - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}},$$

где \bar{d} , d_{\max} и d_{\min} – среднее, максимальное и минимальное расстояния хромосом в популяции от наилучшей, соответственно.

Диапазон значений параметра *GD* – [0, 1] (рис. 2). При низких значениях параметра *GD*, большинство хромосом в популяции концентрируется вокруг лучшей хромосомы, и таким образом достигается сходимость. В противном случае (при больших значениях *GD*) большинство хромосом популяции равномерно распределены в пространстве поиска.

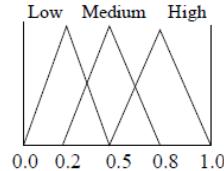


Рис. 2. Значение лингвистической переменной для параметра *GD*

Второй пример входного параметра – это показатель фенотипического разнообразия (*PD*), определяемый выражением:

$$PD = \frac{f_{best}}{\bar{f}},$$

где \bar{f} и f_{best} – среднее и лучшее значение функции приспособленности популяции соответственно.

Значения параметра *PD* может принимать на интервале [0, 1]. Если значение *PD* близко к 1, то достигнута сходимость, если оно близко к 0, то популяция демонстрирует высокий уровень разнообразия.

Набор лингвистических переменных для этих входных данных – {Low, Medium, High} (рис. 3).

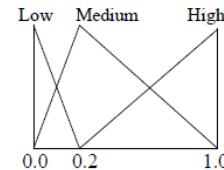


Рис. 3. Значение лингвистической переменной для параметра *PD*

Также в качестве входных данных могут использоваться такие величины, как:

- Дисперсия значений функции пригодности:

$$Var = \frac{f_{\max} - \bar{f}}{f_{\max} - f_{\min}},$$

где \bar{f} , f_{\max} , f_{\min} – среднее, максимальное и минимальное значения функции пригодности решений популяции соответственно;

- Расстояние между значением функции пригодности лучшего родителя и f_{\max} :

$$G = \frac{f_{\max} - \max\{f(X), f(Y)\}}{f_{\max} - f_{\min}},$$

X и Y – это две хромосомы, подлежащие скрещиванию (для задачи максимизации);

- Расстояние между X и Y :

$$D = d(X, Y);$$

- Нормализованные значения функций пригодности:

$$f_1 = f(X) / f_{max},$$

$$f_2 = f(Y) / f_{max}.$$

Значение Var является общим для всей популяции, а G, f_1, f_2 и D – это показатели, определенные для конкретных выборок. Значения всех показателей заданы на интервале $[0, 1]$. Их набор лингвистических меток равен $L = \{\text{Small}, \text{Big}\}$.

Параметр p_e управляет характеристиками оператора кроссинговера, т.е. увеличивает либо уменьшает разнообразие решений. Параметр η_{min} , аналогичным образом позволяет управлять параметрами оператора отбора. Манипулирование этими параметрами позволяет НЛК эффективно управлять разнообразием популяции. Например, если НЛК обнаруживает полезное разнообразие, то он устанавливает значение операторов отбора и кроссинговера, соответствующее задаче сохранения и использования разнообразия. Если уровень разнообразия большой, а его качество невысокое, то НЛК увеличивает селективное давление и пытается получить решения с лучшим значением ЦФ, одновременно с помощью оператора кроссинговера расширяя область эксплуатации. Все эти и другие, подобные им соображения заложены в основу базы правил НЛК [13].

Выходными данными в блоке нечеткого управления (НЛК) являются значения Δp_e и $\Delta \eta_{min}$, которые управляют изменением текущих значений параметров p_e и η_{min} , которые поддерживаются в пределах диапазона $[0.25, 0.75]$. Переменные Δp_e и $\Delta \eta_{min}$ – это величина изменения текущего значения переменных p_e и η_{min} соответственно. Изменение выполняется путем умножения значений Δp_e и $\Delta \eta_{min}$, полученных на выходе НЛК, на текущие значения p_e и η_{min} соответственно. Интервал, в котором могут принимать значения переменные Δp_e и $\Delta \eta_{min}$ равен примерно $[0.5, 1.5]$, а связанные с ними лингвистические метки – $\{\text{Small}, \text{Medium}, \text{Big}\}$ (рис. 4).

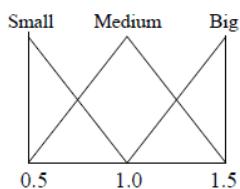


Рис. 4. Значение лингвистических переменных для параметров Δp_e и $\Delta \eta_{min}$

В базе данных каждый вход и выход должен иметь соответствующий набор лингвистических меток. Значение этих меток задается с помощью функций принадлежности нечетких множеств. Необходимо, чтобы каждый вход и выход имели ограниченный диапазон значений, чтобы определить их функции принадлежности. После выбора входных и выходных данных и определения базы данных следует определить нечеткие правила, описывающие отношения между ними. Для этого ис-

пользуются механизмы автоматического обучения, то есть функции принадлежности могут быть определены автоматически с учетом достаточно сложного характера взаимодействия между значениями управляющих параметров ГА и его производительностью. Можно выделить два метода обучения на основе нечетких правил: метод априорного обучения и коэволюция с нечетким поведением.

Механизм априорного обучения основан на работе с набором тестовых функций, которые не имеют ничего общего с решаемой конкретной задачей, что может влиять на надежность возвращаемых баз нечетких правил. Механизм выполняется один раз, однако он сопряжен с высокими вычислительными затратами.

Коэволюция с нечетким поведением использует дополнительный ГА, который развивается совместно с НГА. Базы нечетких правил изучаются с учетом только конкретной решаемой задачи, что дает возможность хороной адаптации полученной базы нечетких правил.

Было предложено использовать НЛК для того, чтобы: выбирать параметры управления перед запуском алгоритма; иметь возможность настраивать значения параметров управления в режиме реального времени для динамической адаптации к новым ситуациям и помочь пользователю в разработке и тестировании ГА для решения конкретной задачи. Использование НЛК позволяет решать проблемы недостаточной скорости поиска и преждевременной сходимости.

Исследования проводились для НГА, который управляет значениями p_c и p_m с помощью двух НЛК. Оба НЛК имели одинаковые исходные данные: набор решений (поколение) и численность популяции. В результате тестирования был получен набор основных нечетких правил для управления значениями вероятности выполнения операторов кроссинговера и мутации (табл. 1, 2). При этом можно сделать вывод, что для достижения наилучшего значения функции пригодности ГА, значение p_m должно уменьшаться по мере сходимости алгоритма к локальному оптимуму.

База правил, иногда называемая лингвистической моделью, представляет собой множество нечетких правил.

ТАБЛИЦА 1. НЕЧЕТКИЕ ПРАВИЛА ДЛЯ p_c

Поколение	Размер популяции		
	Small	Medium	Big
Short	Medium	Small	Small
Medium	Large	Large	Medium
Long	Very Large	Very Large	Large

ТАБЛИЦА 2. НЕЧЕТКИЕ ПРАВИЛА ДЛЯ p_m

Поколение	Размер популяции		
	Small	Medium	Big
Short	Large	Medium	Small
Medium	Medium	Small	Very Small
Long	Small	Very Small	Very Small

В соответствии с обобщенным нечетким правилом modus ponens на выходе блока выработки решения формируется либо одно, либо N нечетких множеств. Тогда отображение этих нечетких множеств (или множества) в единственное значение, которое представляет собой управляющее воздействие на объекты управления НЛК,

называется дефазификацией (defuzzification). Наиболее распространенными являются следующие методы дефазификации:

1. Метод дефазификации по среднему центру (center average defuzzification).
2. Метод дефазификации по сумме центров (center of sums defuzzification).
3. Метод дефазификации по центру тяжести (center of gravity method, center of area method).
4. Метод дефазификации по максимуму функции принадлежности.

Исходными данными для НГА должны быть надежные показатели, описывающие поведение ГА и влияние параметров генетических операторов. Среди возможных параметров можно выделить следующие: показатели разнообразия популяции решений, значения максимальной, средней и минимальной оценки функции приспособленности и т.д. Текущие значения управляющих параметров также могут рассматриваться в качестве входных данных. Выходные данные представляют собой значения управляющих параметров или изменения в этих параметрах, например, вероятность мутации; вероятность кроссинговера; размер популяции; селективное давление; время, в течении которого алгоритм должен достичь требуемого значения целевой функции, чтобы считаться успешным; степень удовлетворенности качеством полученного решения и т.д.

2. Разработка и модификация операторов кроссинговера. Эффективность ГА во многом зависит от их используемого оператора кроссинговера. Это, с одной стороны определяет характеристики алгоритма, а с другой, является резервом улучшения ГА. Оператор кроссинговера играет основную роль в проблеме в поддержании баланса между «разведкой» новых областей и эксплуатацией существующих решений, поэтому именно на нем сосредоточено внимание для решения проблемы преждевременной сходимости.

Нечеткие связки и треугольные функции распределения вероятности можно использовать для создания эффективных операторов кроссинговера, которые в состоянии поддерживать необходимый уровень разнообразия популяции и бороться с преждевременной сходимостью алгоритма.

Оператор кроссовера является определяющим элементом в задаче поддержания баланса между исследованием и эксплуатацией. Таким образом, важной задачей является разработка операторов кроссовера, которые позволяют поддерживать необходимый баланс разведки и эксплуатации.

В литературе описаны различные модификации операторов кроссинговера для нечеткого генетического алгоритма. Например, кроссоверы на основе нечетких связей (Fuzzy Connective-Based crossovers, FCB-crossovers), операторы кроссовера для решений на основе вещественного кодирования (RC-GAs), операторы кроссовера, основанные на использовании нечетких связок (t -нормы, s -конормы, функции усреднения и т.д.) [14].

В научной литературе описано большое количество различных операторов кроссинговера для генетических алгоритмов с вещественным кодированием.

- Унимодальный оператор кроссинговера с нормальным распределением (unimodal normal distribution crossover – UNDX) на основе множества родителей создает решения-потомки, распределенные вокруг центра массы этих родителей. При этом, чем дальше решение находится от центра массы, тем меньшая вероятность ему назначается.
- Симплексный кроссинговер (SPX) назначает однородное распределение вероятности для того, чтобы создать потомство в ограниченном пространстве поиска вокруг области занятой родителями.
- Родительски центрированный оператор рекомбинации, который присваивает тем большую вероятность создаваемым решениям-потомкам, чем ближе они находятся к родителям в пространстве поиска.

В качестве примера генетического оператора на основе вещественного кодирования можно привести оператор неоднородной мутации, который уменьшает интенсивность мутации генов по мере продвижения к оптимуму. Эта особенность данного оператора мутации приводит к тому, что в начальной области выполняется практически однородный поиск, а затем в отдельных локальных областях характер поиска варьируется.

Можно также упомянуть еще ряд модифицированных операторов кроссинговера: смешивания; имитирующий бинарный; арифметический; промежуточный; расширенный – которые можно рассматривать в качестве разновидностей перечисленных выше операторов.

Был также предложен механизм отбора потомства, полученного после применения операторов FCB-кроссовера. Таким образом, с помощью операторов FCB-кроссовера можно контролировать соотношение разведки и эксплуатации и изменять их значения, а механизмы отбора потомства поддерживают взаимосвязь между этими характеристиками, чтобы решить проблему преждевременной сходимости.

В одном НГА могут использоваться два разных оператора кроссинговера: один для задачи эксплуатации, а другой – для задачи разведки. При этом параметр p_e , определяет частоту применения оператора кроссинговера для задачи эксплуатации. Значение параметра p_e оказывает существенное влияние на баланс разведка/эксплуатация с помощью оператора кроссинговера; если значение p_e низкое, то задача алгоритма повышение разнообразия, и, следовательно, приоритетной является задача разведки новых областей пространства поиска; если же значение p_e – высокое, то приоритетной становится задача эксплуатации и тогда текущее разнообразие популяции должно использоваться для генерации лучших элементов.

Также в НГА используется механизм линейного ранжирования. При этом выбор селективного давления (давления отбора) определяется параметром $\eta_{min} \in [0, 1]$. Если значение параметра η_{min} низкое, то селективное давление на популяцию – высокое и наоборот.

Настройки управляющих параметров ГА, такие как вероятность мутации (p_m), вероятность скрещивания (p_c) и размер популяции (N), являются ключевыми факторами при определении компромисса между «эксплуатацией» и «разведкой».

3. Кодирование решений. Кроме традиционного для классических генетических алгоритмов бинарного кодирования решений, когда гены могут принимать значения ноль или единица может быть использовано нечеткое кодирование. Кодирование на основе вещественных чисел наиболее эффективно решении задач параметрической оптимизации с переменными, заданными в непрерывных областях значений. При таком кодировании хромосома обычно представляет собой вектор чисел с плавающей запятой, причем размер чисел соответствует длине вектора.

4. Критерии остановки. Такие свойства нечеткой логики как степень истинности (мера доверия), оценка достоверности логической функции могут быть использованы для получения оптимальных решений с заданной пользователем точностью, для прогнозирования результатов и регулирования скорости выполнения генетического алгоритма в зависимости от качества текущих результатов.

Для оценки эффективности ГА в режиме реального времени можно использовать механизм нечетких критериев остановки (FSCM). Механизм FSCM основан на достижении заданного пользователем уровня производительности для данной задачи. Для оценки оптимального решения FSCM использует основанный на статистике механизм прогнозирования. После оценки FSCM сравнивает текущее решение с этим оптимальным, проверяя, достигнут ли указанный пользователем приемлемый процент эффективности. Если условие выполняется, то ГА останавливается и выводит значения те показателей достоверности и неопределенности, которые обеспечивают заданную меру надежности для выбранного варианта решения. Процесс прогнозирования запускается каждые 40 итераций и использует такие значения производительности как: минимальная величина решения, среднее значение множества решений, а также степень уверенности и правдоподобия, полученные в ходе выполнения алгоритма.

Основное преимущество использования FSCM состоит в том, что пользователю не нужно искать глобальный оптимум, достаточно найти решение, приближенное к оптимальному. Таким образом, ГА используется для достижения нечеткого значения целевой функции (оптимального решения), который задается пользователем как приемлемый уровень, удовлетворяющий имеющимся требованиям.

Можно выделить различные подходы к построению адаптивного ГА на основе НЛК в зависимости от используемого способа получения баз нечетких правил. Например, базы нечетких правил, основанные на знаниях и опыте экспертов ГА, базы знаний, которые связаны с механизмом априорного обучения, и, наконец, в базы знаний, которые включают коэволюцию с нечетким поведением.

Для создания базы нечетких правил могут быть использованы опыт и знания экспертов ГА. Также для решения данной проблемы используют процедуру автоматического обучения. Благодаря этому, соответствующие отношения и функции принадлежности, отражающие сложный взаимосвязь между параметрами управления и производительностью ГА могут быть определены автоматически.

Механизм априорного обучения основан на той же идее, что и мета-ГА Грефенштетта. Он работает с учетом набора тестовых функций, которые не имеют ничего общего с решаемой задачей, что может влиять на достоверность возвращаемых баз нечетких правил. Процедура выполняется однократно, но тем не менее требует больших вычислительных затрат.

Также для решения данной проблемы применяется механизм коэволюции с нечетким поведением, когда используется дополнительный ГА, который развивается параллельно с основным нечетким ГА.

Основанный на использовании НЛК нечеткий ГА считается наиболее эффективным алгоритмом решения классических NP-полных задач оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тьюринг А. Вычислительные машины и разум. – М.: ACT, 2018.
2. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. – Univ. Michigan, Ann Arbor, 1975.
3. Goldberg David E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. – Addison-Wesley Pub. Co, 1989.
4. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010.
5. Michalewicz Z., Fogel David B. How to Solve It: Modern Heuristics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
6. Davis L. Handbook of Genetic Algorithms. – Van Nostrand Reinhold, NY, 1991.
7. Grefenstette J.J. Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1986. – Vol. 16, No. 1. – P. 122-128.
8. Rechenberg I. Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. – Frommann-Holboog Verlag, Stuttgart, 1973.
9. Herrera F., Lozano M. Fuzzy Adaptive Genetic Algorithms: design, taxonomy, and future directions // J. Soft Computing. Springer-Verlag. – 2003. – P. 545-562.
10. Гладков Л.А. О некоторых подходах к построению гибридных интеллектуальных систем для решения графовых задач // Новости искусственного интеллекта. – 2000. – № 3. – С. 71-90.
11. Zadeh L.A. Fuzzy algorithms // Information and Control. – 1968. – 12. – P. 94-102.
12. Michael A., Takagi H. Dynamic control of genetic algorithms using fuzzy logic techniques // Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms. – Morgan Kaufmann, 1993. – P. 76-83.
13. Гладков Л.А., Гладкова Н.В. Генетические алгоритмы: от ПГА к нечетким гибридам // Международный научно-технический конгресс «Интеллектуальные системы и информационные технологии - 2023». Труды конгресса. Т. 1. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2023. – С. 174-185.
14. Herrera F., Lozano M., Verdegay J.L. Fuzzy connectives based crossover operators to model genetic algorithms population diversity // Fuzzy Sets and Systems. – 1997. – 92 (1). – P. 21-30.

Анализ динамики выручки и структурных изменений стабильных российских компаний

Полунин Юрий Алексеевич

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова

Российская академия наук

Москва, Россия

yplnn@yandex.ru

Аннотация. В докладе рассматриваются нелинейные процессы, динамики выручки 23943 российских компаний с 2003 по 2022 годы. Анализ проводится с использованием нелинейных аппроксимирующих моделей на базе отображений. Динамика выручки и структурные изменения внутри компаний анализируются на примере четырех одинаковых по численности групп компаний, образованных в зависимости от величины выручки. По эмпирическим данным выявлены годы, когда динамика выручки всех или части группы оказывается взаимосвязанной. Для этих моментов определено как меняются общие ресурсы развития (рыночные ниши) и как меняется их разделение между группами компаний.

Abstract. The report examines nonlinear processes and revenue dynamics of 23,943 Russian companies from 2003 to 2022. The analysis is carried out using nonlinear mapping-based approximating models. The dynamics of revenue and structural changes within companies are analyzed using the example of four groups of companies of equal size, formed depending on the amount of revenue. Empirical data have identified years when the revenue dynamics of all or part of the groups turn out to be interrelated. For these moments, it is determined how the general development resources (market niches) change and how their division between groups of companies changes.

Ключевые слова: выручка компаний, нелинейный процесс, ресурсы развития, рыночные ниши.

Keywords: company revenue, nonlinear process, development resources, market niches.

I. ВВЕДЕНИЕ

Целью исследования является выявление закономерностей и анализ динамики выручки и структурных изменений на уровне групп наиболее стабильных российских компаний в зависимости от их размера. Под стабильными понимаются российские компании, отчетность которых в Росстате с 2003 по 2022 годы отвечала следующим требованиям: выручка в любой год не менее 1 миллиона рублей; данные о выручке есть за каждый год (без пропусков). В дальнейшем анализе используются данные этих компаний. Такие требования отбора диктовались желаниями, как выявить и проанализировать наиболее стабильную часть российских компаний, так и избавиться по возможности от статистических шумов, присутствующих при рассмотрении реальных исходных данных по отчетности всех компаний. Всего российских компаний, отвечающих таким критериям отбора, оказалось 23943, вполне достаточная выборка для получения представления о динамике выручки и структурных изменениях компаний разного размера. Закономерности происходящих процессов выявляются с применением методов, описания и анализа нелинейных

процессов, базирующихся на нелинейной парадигме. Суть методов изложена в [1]. Трактовка полученных результатов проводится с позиций развития компаний в соответствующих рыночных нишах [2].

II. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНОЙ ВЫБОРКИ

Для рассмотрения структуры компаний по размеру воспользуемся ежегодными квартальными значениями выручки, которые являются границами, делящими исходную совокупность компаний на четыре равные группы. Их изменения отражают общую картину изменения структурных границ групп разных по размеру компаний. Значения квартилей выручки всех рассматриваемых компаний приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. КВАРТИЛИ РАЗМЕРА ВЫРУЧКИ КОМПАНИЙ

Год	Первый квартиль Q1 млн. руб.	Второй квартиль Q2 (медиана) млн. руб.	Третий квартиль Q3 млн. руб.
2003	8,1	23,8	72,4
2004	10,0	29,5	88,9
2005	12,0	35,7	108,0
2006	14,6	43,0	133,2
2007	18,1	53,6	166,8
2008	21,1	62,7	196,9
2009	19,1	57,3	178,2
2010	20,9	62,5	200,5
2011	22,7	69,3	227,1
2012	23,6	73,3	243,7
2013	23,4	73,7	250,1
2014	23,5	75,2	259,3
2015	23,3	75,9	268,2
2016	23,0	76,7	277,7
2017	22,4	74,8	277,5
2018	21,9	75,1	286,3
2019	20,9	74,6	288,1
2020	19,0	71,9	283,0
2021	19,6	77,1	314,0
2022	19,2	79,5	335,4

В силу разных масштабов величин выручки квартир в рублях, отличающихся на порядки, приводить совместные графики динамики выручки каждого из квартилей нецелесообразно. Рассмотрим динамику текущих значений квартилей выручки компаний, нормированную по значениям квартилей в 2003 году. Динамика в таких сопоставимых единицах представлена в виде траекторий на рис. 1.

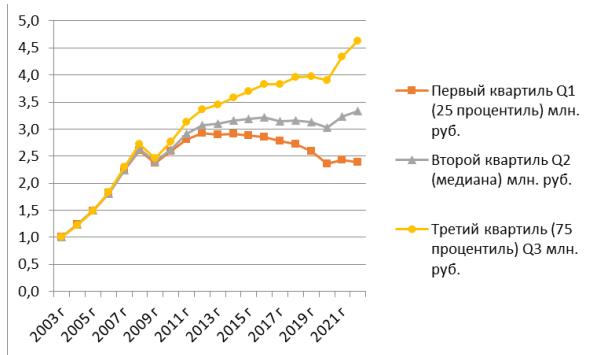


Рис. 1. Текущие нормированные значения квартилей

Во-первых, на основании графика на рис. 1 можно сделать заключение, что на качественном уровне границы разных по размеру групп компаний однородны, это выражается в том, что наиболее сильные изменения совпадают по времени. Особенно обращает внимание, что траектории одновременно резко разошлись с 2009 года после мирового кризиса. Во-вторых, за весь рассматриваемый период перед нами явно нелинейные процессы, по ходу которых происходят значительные изменения факторов, влияющих на их динамику. Качественное сходство траекторий квартилей позволяет провести первичный анализ структурных изменений, используя в дальнейшем их значения как границы разделения на группы разных по величине выручки компаний. Рассматриваемые траектории отражают в виде нелинейных процессов эволюции стабильных российских компаний, проявляющихся в значениях квартилей выручки.

III. НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ВЫБОРКИ

Выберем модель для анализа, исходя из следующих рассуждений. Для эволюции размеров любых систем, в том числе и рассматриваемой совокупности компаний, необходимы ресурсы, а ресурсы всегда ограничены. Ограниченнность ресурсов для рассматриваемых компаний определяется конечным размером рыночной ниши российской экономики, в которой развивается компания. Из ограниченности ресурсов эволюции российских компаний следует, что и процессы изменения выручки развиваются в условиях ограничений. Собственно, ограниченность ресурсов эволюции и приводит к нелинейности процессов изменения выручки компаний. Такие процессы необходимо анализировать с позиций нелинейной парадигмы. В работе [3] подчеркивается целесообразность применения для анализа нелинейных процессов по эмпирическим данным моделей в виде нелинейных отображений. Нелинейные отображения рассматриваются как упрощенные модели, заменяющие дифференциальные уравнения в анализе эмпирических данных. С учетом нелинейности процессов можно сформулировать общие требования к свойствам моделей для анализа ди-

намики выручки. Поскольку перед нами нелинейный процесс, то в нем заложена неопределенность, заключающаяся в том, что анализируемые одинаковые эмпирические данные могут быть порождены принципиально разными нелинейными закономерностями. Задача точного определения по эмпирическим данным истинных законов, порождающих процесс, оказывается неразрешимой. В моделях для анализа нелинейных процессов изменения выручки целесообразна только возможность аппроксимации эмпирических данных, что позволяют сделать аппроксимирующие модели в виде нелинейных отображений.

Для выявления основных закономерностей, которым должны отвечать модели для анализа нелинейных процессов выручки рассмотрим следующую рыночную ситуацию, протекающую в дискретном времени. Будем представлять динамику значений выручки типичной компании каждой группы исходя из следующих соображений. В каждый момент времени компания с величиной выручки X_n , изменяет текущую выручку используя с определенной интенсивностью A , ресурсы, заключенные в еще не занятой на данный момент части рыночной ниши F_n . Такая ситуация развития компаний при заполнении рыночных ниш рассмотрена в [1]. При этом, часть исходной рыночной ниши уже занята с закономерностью $\varphi(X_i)$. Для дальнейшего анализа выразим исходный размер рыночной ниши K через сумму свободной и занятой части ниши $F_n + \varphi(X_i)$, тогда можно представить размер выручки на следующем шаге X_{n+1} в виде отображения (1):

$$X_{n+1} = X_n + X_n A (K - \varphi(X_i)). \quad (1)$$

В отображении (1) есть два параметра – интенсивность занятия свободной части рыночной ниши A (интенсивность процесса) и исходный размер рыночной ниши K (применительно к динамике выручки это ограничение процесса, определяемое исходным размером рыночной ниши). Закономерность занятия ниши $\varphi(X_i)$ для достижения текущего размера компании априорно неизвестна – в рыночной нише может быть не одна компания, и для более полного анализа целесообразно использовать несколько моделей, основанных на разных ситуациях закономерностей занятия ниши. Такой подход позволяет получать углубленную картину динамики, аппроксимируя эмпирические данные процессов разными моделями.

IV. БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ. СВОЙСТВА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПО ЭМПИРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Примем в качестве первого варианта анализа динамики процесса ситуацию, когда компания одна в рыночной нише. Тогда свободная часть ниши определяется разностью между исходным размером ниши K_X и частью ниши уже занятой компанией X_n . В таком случае изменения выручки типичной компании каждой группы можно описать следующим отображением:

$$X_{n+1} = X_n A_X (K_X - X_n), \quad (2)$$

где X_n – текущее значение выручки компании группы в момент n ; A_X – интенсивность занятия свободной части рыночной ниши; K_X – первоначальный размер рыночной ниши, выражаемый в выручке). На основании такого отображения можно, построить базовую аппроксими-

рующую модель, параметры которой определяются на основании эмпирических данных. Модель позволяет описать закономерности динамики реальных нелинейных процессов, развивающихся в условиях ограничений на основании преобразованных исходных данных. Повод назвать ее базовой, заключается в универсальности модели на базе отображения (2) для аппроксимации значений процессов, порождаемых широким классом функций, соответствующих теории универсальности Фейгенбаума [4]. В отличие от широко используемого логистического отображения отображение (2) содержит дополнительное слагаемое X_n , придающие отображению несколько другие свойства.

Трех подряд значений процесса достаточно для определения значений параметров модели (2), аппроксимирующей эти значения процесса на данном временном участке:

$$A_x = \frac{x_1^2 - x_0 x_2}{x_0 x_1 (x_1 - x_0)} \quad (3)$$

$$K_x = \frac{x_1 - x_0}{x_0 A_x} + X_0. \quad (4)$$

При числе эмпирических значений более трех можно описывать анализируемый процесс по методу «скользящее временное окно», получая по трем подряд эмпирическим данным значения параметров базовой модели, описывающим тенденцию развития процесса в текущем временном окне. Сдвигая каждый раз временное окно на один шаг, мы получаем новые оценки набора параметров базовой модели, по которым проводится дальнейший анализ динамики выручки. Несмотря на кажущуюся простоту базовой модели на основе аппроксимирующего отображения (2) ее возможности точной аппроксимации разнообразной вариантов нелинейной динамики очень велики. Можно точно аппроксимировать S-образные процессы; колебательные процессы любой частоты; динамический хаос. Такая модель позволяет точно аппроксимировать значения процессов, порождаемых широким классом функций, отвечающим критериям теории универсальности.

Для более наглядных и сопоставимых представлений о характере динамики отображение (2) нормируют по значению K_x , в результате получается отображение:

$$x_{n+1} = x_n + a_x x_n (1 - x_n), \quad (5)$$

где x_n – нормированное по K_x значение процесса; $a_x = A_x K_x$ – нормированная интенсивность, ее величина однозначно определяет характер динамики. При положительных значениях нормированной интенсивности a_x характер динамики будет следующий. При $0 < a_x < 1$ динамика соответствует наиболее гладкому S-образному процессу, движущемуся к устойчивой особой точке, равной ограничению процесса; при $1 < a_x < 2$ вблизи значения ограничения процесса происходят затухающие колебания относительно особой точки (S-образная траектория с перерегулированием). При $2 < a_x$ колебания не затухают, и по мере увеличения значения нормированной интенсивности a_x реализуется сценарий Фейгенбаума перехода к хаосу через каскады бифуркаций удвоения периода.

Кроме анализа процесса по значениям параметров базовой модели ее можно использовать для оценки степени изменений, влияющих на процесс факторов. Полученные

для окна j параметры базовой аппроксимирующей модели K_{Xj} и A_{Xj} отражают сформировавшуюся в данном окне тенденцию. По полученным параметрам базовой модели и значению процесса $X_{j,2}$ можно спрогнозировать, каким должно быть следующее за данным временном окном значение $X_{j,3}^*$ (знаком «*» обозначаются спрогнозированные значения процесса в предположении неизменной тенденции):

$$X_{j,3}^* = X_{j,2} + X_{j,2} A_{Xj} (K_{Xj} - X_{j,2}). \quad (6)$$

Если в тенденции произошли изменения, из-за изменения влияющих на процесс факторов, то реальное значение процесса $X_{j,3}$ будет отличаться от предсказанного $X_{j,3}^*$. Относительное отклонение процесса от сформировавшейся ранее тенденции является еще одним параметром анализа, его значение можно оценить следующим образом:

$$\delta X_{j,3}^* (\%) = \frac{X_{j,3} - X_{j,3}^*}{X_{j,3}^*} * 100. \quad (7)$$

Закономерности развития тенденций процесса и отклонения от них можно описывать не только по базовой модели, но и используя модели других типов, построенных с разными предположениями закономерностей занятия рыночной ниши $\varphi(X_i)$. Величины отклонений (7) реальных значений процесса от сформировавшейся в каждом окне тенденции позволяет оценивать степень изменений влияющих факторов в предположении разных гипотез о закономерностях занятия ниши. Эта оценка не зависит от текущих значений процесса, что позволяет сопоставлять между собой степень изменений воздействующих на процесс факторов на разных стадиях развития процесса.

Таким образом, используя для каждого временного окна аппроксимирующую модель, мы преобразуем исходные значения процесса в новые переменные $\delta X_{j,3}^*$, K_{Xj} , x_n , a_j , позволяющие по-другому анализировать динамику процесса. Для анализа динамики по базовой модели не всегда можно использовать все значения переменных. Это связано с возникающими переходными процессами при изменении воздействующих факторов. Например, при ступенчатом изменении воздействующего фактора, в расчеты параметров (3) и (4) попадут данные, относящиеся к разным закономерностям, поэтому полученные результаты нельзя рассматривать как описывающие новую тенденцию. Такие ситуации по значениям A_x и K_x непосредственно не анализируются, но на основе полученных значений параметров можно оценить отклонение, от тенденций, позволяющее увидеть характер воздействия изменений.

Динамика медианы выручки всех компаний дает общее представление эволюции выручки за рассматриваемый временной период, поэтому, в качестве первого шага анализа целесообразно использовать базовую аппроксимирующую модель для значений медианы. Полученные в ходе расчетов данные позволяют провести обобщающий анализ изменений воздействующих на процесс факторов. По значимым отклонениям от тенденции (считая отклонения более 5% значимыми) можно выявить годы наиболее значительных изменений в характере динамики и знак этих изменений. Это 2008, 2009 годы, когда проявилось отрицательное влияние мирового кризиса

(значения отклонений от сформировавшихся тенденций - 10,2% и -17,3%), 2011 год - положительные посткризисные изменения (+20,6%). В 2012 году отрицательное значение отклонения (-6,8%) говорит о том, что тенденция непосредственно кризисной динамики и выхода из нее закончилась и далее идет развитие по новым посткризисным закономерностям. Двухпроцентные отклонения от тенденции в 2013 и 2014 годах подтверждают такую трактовку. Менее значительные отрицательные отклонения в 2015 (-6,5%), 2018 (-5,5%) и 2020 годах (-4,7%) отражают влияние санкций и Ковида. Величина двух положительных отклонений в 2021 (28,5%) и 2022 году (19,3%) отражают положительные эффекты отмены ковидных ограничений и развитие импортозамещения. Можно сделать вывод, что наиболее сильные отклонения от описываемых по базовой модели тенденций происходят во времена явных изменений ситуации в экономике и поддаются интерпретации. При таких предпосылках можно провести приблизительное сравнение относительных величин отклонений от сформировавшихся тенденций. Можно говорить о сильнейшем отрицательном влиянии мирового экономического кризиса, проявившемся на коротком временном интервале, но, тем не менее, как будет видно далее, задавшем новые закономерности развития. Кроме того видны растянутые по времени гораздо менее сильные по воздействию отрицательные эффекты санкций с 2015 г. Эти отрицательные эффекты сменились самыми сильными положительными влияниями на динамику выручки в 2021, 2022 годах.

Рассмотрим, как можно оценить изменения рыночных потенциалов за рассматриваемый временной интервал. Для представления о качественных различиях докризисной и посткризисной динамики выручки, отражаемой в медианных оценках, сравним полученные значения трех параметров базовой модели до и после кризиса. Представление об изменениях дадут значения ограничений процесса K_x , нормированные значения процесса x_n и его нормированные интенсивности a_x . Оценки ограничений процесса оказались близкими, в 2022 году они составили 103,4% от уровня 2005 года. Оценим по нормированным значениям процесса, сколь далеко от ограничений находился процесс. В 2005 году нормированные значения процесса составляли только 45,4% от ограничений и существовали большие возможности дальнейшего устойчивого роста с учетом того, что значения нормированной интенсивности равно 0,34. Это соответствует S-образной кривой, и при таких нормированных значениях процесса развитие в 2005 году шло с относительно большой скоростью. После кризиса с 2009 года нормированные значения процесса в основном оказываются близкими к единице, что говорит о малой скорости роста из-за существенного влияния ограничений роста. В 2022 году процесс развивался тоже по S-образной кривой (нормированная интенсивность 0,62), но с малой скоростью, ибо был около ограничения (нормированное значение 0,979). При небольшом по сравнению с 2005 годом увеличении рыночного потенциала в 2022 году скорость роста процесса существенно упала и определяется динамикой вблизи рыночного ограничения (значения особой точки). Мировой экономический кризис резко уменьшил возможности роста типичной российской компании рассматриваемой совокупности. Поскольку после мирового кризиса динамика медианы выручки

проходила вблизи потенциалов роста (особых точек), то на основании значений нормированных интенсивностей можно качественно описать характер динамики, который определяется устойчивостью особых точек, определяемой значениями нормированных интенсивностей. До 2016 года характер динамики был в основном S-образный, либо с затухающими колебаниями в 2009, 2010 году. С 2017 года процесс начал развиваться с доминированием ситуаций динамического хаоса, который прекратился лишь в 2022 году, когда процесс вернулся к S-образной динамике. Следует отметить, что, несмотря на то, что отклонения значений процесса от потенциалов малы (это видно из нормированных значений x_n), амплитуды затухающих и хаотических колебаний повсеместно малы – максимальная амплитуда менее 0,5% от величины рыночного потенциала. Однако эти различия в характере динамики четко и стабильно выявляются базовыми моделями. Описание характера динамики можно рассматривать, как качественную оценку стабильности развития в диапазоне от стабильной гладкой траектории до хаотической.

Еще более детализированное, но достаточно общее представление дают медианные оценки параметров моделей за рассматриваемый временной период, описывающих процессы изменения других квартильных, а также 10 и 90 процентильных значений выручки компаний. Значения медиан отклонений от тенденций для таких процессов, представленных по базовым моделям, оказываются достаточно малыми и во всех случаях не превышают 2%. Это позволяет сделать вывод об однородности результатов аппроксимации динамики компаний разного размера и возможности использовать медианные оценки параметров моделей для описания общих закономерностей процессов, соответствующих выручке разного размера. При этом прослеживаются некие закономерности в изменениях значений параметров моделей по мере перехода к данным больших квартилей, но причинами их проявления могут быть как увеличение объема выборки, так и включение все более крупных компаний. Для более детального анализа целесообразно разделить влияние этих факторов.

V. РАЗБИЕНИЕ КОМПАНИЙ НА ГРУППЫ РАЗНОГО РАЗМЕРА ВЫРУЧКИ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИКИ ВЫРУЧКИ ТИПОВЫХ КОМПАНИЙ ГРУПП

Для более глубокого анализа протекающих процессов, исходная совокупность компаний была разбита на четыре одинаковых по размеру группы, в зависимости от величины выручки. В качестве исходного года для разбиения компаний по величине выручки был выбран 2009 год исходя из следующих аргументов. На качественном уровне характер динамики значений всех квартилей, как видно на рис.1 не отличается между собой. Но, если характер динамики разных квартирелей до 2009 года практически совпадал, то влияние мирового кризиса проявилось в существенном расхождении траекторий, нормированных значений разных квартирелей. Поэтому можно принять квартильные оценки 2009 года за отправные точки для анализа посткризисной эволюции всей совокупности стабильных российских компаний. Значения квартирелей выручки компаний за 2009 год, приведенные в табл. 1 были использованы в качестве границ групп компаний. В результате появились четыре группы компаний, названные: «до 25 процента»; «25-50 процентилей»;

"50-75 процентиляй"; "более 75 процента". В каждой группе немного менее 6000 компаний. Поскольку значения медиан выручки разных по размерам компаний групп сильно отличаются, то на рис. 2 приведены значения процессов, нормированные по медианам для каждой группы в 2003 году.

Как следует из рис. 2 характер динамики нормированных медианных выручек каждой из групп качественно близки, основные отличия в масштабах. Расходящиеся траектории, а также смещение относительно друг друга двух траекторий групп компаний, относящимся к средним по размеру, может являться отражением структурных изменений, которые надо проанализировать. Смещение траекторий видно в нормированных значениях процессов, а не по реальным значениям характеристик выручки каждой группы. Для оценки структурных изменений необходимо провести анализ по реальным значениям медиан выручек каждой группы.

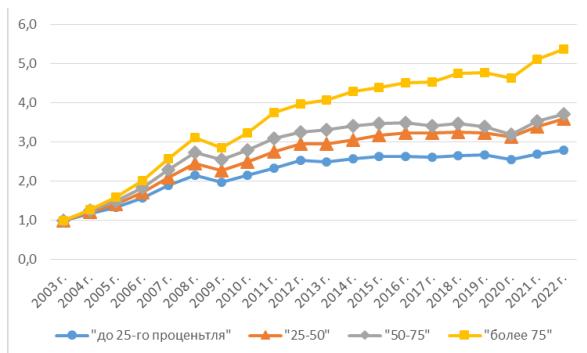


Рис. 2. Медианы выручки групп разных по размеру компаний в долях от значений медиан 2003 года.

О возможности описывать динамику медианных значений выручек групп говорят и обобщенные характеристики отклонений от тенденций. Малые (менее 1,5%) значений медиан отклонений от тенденций, описываемых по базовым моделям, свидетельствует, что параметры базовых моделей можно использовать для дальнейшего анализа процессов, развивающихся в совокупности анализируемых компаний. Значения медиан нормированных интенсивностей для всех групп компаний (они положительные и меньше единицы), позволяют сделать обобщающие выводы, что процессы каждой из групп можно описать как развивающиеся в основном по S-образной кривой к устойчивой особой точке (значению ограничения). Полученные результаты говорят о возможной взаимосвязанности процессов в какие-то моменты времени.

VI. МОДЕЛИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ. КРИТЕРИИ ВЗАИМОСВЯЗАННОСТИ

Могут быть ситуации когда в какие то моменты времени в рассматриваемой совокупности компаний есть группы, развивающиеся с использованием одного и того же рыночного ресурса размером K , при этом одновременно могут быть группы, развивающиеся независимо от других в собственных рыночных нишах.

Наиболее простую ситуацию связанных эволюций двух групп компаний использующих один и тот же рыночный ресурс, можно описать системой отображений двух взаимосвязанных процессов X_n и Y_n :

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= X_n + X_n A (K - X_n - Y_n) \\ Y_{n+1} &= Y_n + Y_n B (K - X_n - Y_n) \end{aligned} \quad (8)$$

Модель на базе отображений взаимосвязанных процессов (8) является модификацией базовой модели (2) и описывает два процесса аналогично, в ней A и B – интенсивности процессов (интенсивность использования свободной части рыночного ресурса), K – общий рыночный ресурс развития двух процессов (единственное ограничение процессов). Будем называть такую аппроксимирующую модель на основе отображений (8) *моделью взаимосвязанности*. В этом случае закономерности занятия части рыночной ниши каждой из групп компаний описываются с использованием трех значениям каждого из процессов. При этом есть информационная избыточность, позволяющая по трем значениям каждого из процессов дважды оценить значения параметров модели (8). При использовании трех значений процесса X_n и двух процесса Y_n значения параметров модели (8) определяются следующим образом:

$$A_1 = \frac{X_1^2 - X_0 X_2}{X_0 X_1 (X_1 - X_0 + Y_1 - Y_0)} \quad (9)$$

$$K_1 = \frac{X_1 - X_0}{X_0 A_1} + X_0 + Y_0 \quad (10)$$

$$B_1 = A_1 \frac{X_0 (Y_1 - Y_0)}{Y_0 (X_1 - X_0)}. \quad (11)$$

Второй вариант определения значений параметров модели (8) реализуется с использованием аналогичных выражений для трех значений второго процесса и двух первого. Получив набор двух альтернативных значений параметров модели (8) можно проверить гипотезу о взаимосвязанности процессов в данном временном окне. Для выявления взаимосвязанных процессов по эмпирическим данным воспользуемся тремя критериями [5, 1]. Первый критерий подразумевает близость значений ограничений, полученных по трем значениям одного и другого процесса K_1 и K_2 . Второй критерий оценивает возможность прогнозировать значение процесса, не задействованного в данном варианте нахождения значений параметров модели (8). Результат такого типа прогноза должен быть близким к реальному значению процесса. Третий критерий связывает значения параметров базовых моделей (2) и модели взаимосвязанности (8), значения $K_X + K_Y$ должны быть близки значению K . Вполне понятно, что в силу зашумленности данных критерии не будут выполняться точно. В случае совпадения оценок с определенной точностью можно считать, что гипотеза о взаимосвязанности реальных процессов верна. В этом случае можно оценить точность модели в описании динамики взаимосвязанных процессов. Существующая в соответствии с третьим критерием взаимосвязь параметров двух типов моделей позволяет дополнительно оценить соотношение потенциальных ресурсов развития каждого из взаимосвязанных процессов. Применительно к анализу выручки групп компаний это означает возможность оценить изменение во времени соотношений, по которым разделяется общий ресурс развития между группами компаний. Так, на основании изменения соотношений значений ограничений в моделях можно выявлять и оценивать конкуренцию групп компаний в рамках единой рыночной ниши. Поскольку при взаимосвязанности можно точно аппроксимировать значения процессов моделями двух типов, то модели типа (2) и (8) следует

рассматривать как единый комплекс, позволяющий глубже проводить анализ по сравнению с применением моделей только одного типа.

VII. Выявление времен взаимосвязанности всех групп компаний. Оценки структурных изменений

Для оценки степени взаимосвязанности динамики рассматриваемых процессов проведем анализ данных, с использованием моделей двух взаимосвязанных процессов. Для простоты выявления моментов, когда все четыре процесса проявляют взаимосвязанность динамики, будем оценивать взаимосвязанность с первым процессом, соответствующим группе «до 25-го процентиля», попарно сравнивая с ним все три остальных процесса. Каждый раз, вычисляя рассогласования по всем трем критериям, будем рассматривать максимальные расхождения по любому критерию как оценку взаимосвязанности. На основании данных о рассогласованиях по критериям будем считать, что выполнение критериев взаимосвязанности с максимальным расхождением не более 4%, являются моментами взаимосвязанных процессов.

За время с 2003 по 2022 годы было три ситуации, которые можно рассматривать как взаимосвязанность динамики по всем группам независимо от размеров компаний. Такая ситуация сложилась к 2010 году, когда полностью проявился эффект мирового кризиса и, так называемый, посткризисный отскок, к 2013 году произошел переход к новой, экономической ситуации, нарушенной впоследствии воздействием санкций. С учетом того, что для выявления взаимосвязи процессов используют данные за три года, то можно утверждать, что с периода 2008 по 2013 годы прошли два разных этапа воздействий, вызвавших одинаковую реакцию у всех российских компаний – кризисную и посткризисную. Третий этап одинаковой реакции на воздействия значимых факторов в 2018 -2020 годы, вероятно, был связан с санкциями и антиковидными мероприятиями.

Свойство моделей, что в условиях взаимосвязанных процессов сумма значений ограничений базовых моделей (2) равна значению ограничения модели (8) позволяет оценить, как проходили структурные изменения в разделе общих ресурсов развития под воздействием существенных изменений в экономике. Если значения общего ограничения в модели (8) в условиях взаимосвязанности рассматривать, как единый ресурс развития, то значения ограничений базовых моделей (2) позволяют рассчитать, каков процент от общего российского ресурса используют для развития типичная компания каждой группы. Следует подчеркнуть, что эти расчеты строились с использованием данных группы самых малых компаний «до 25-го процентиля». Результаты расчетов приведены в табл. 2. Для уменьшения размеров таблиц в них в названии групп пропущено слово «процентиля» в разных падежах.

ТАБЛИЦА 2. Величина общего ресурса развития и проценты его распределения между разными по размерам группами компаний

Год	Величина общего ресурса развития млн. руб.	Проценты группы компаний от общего ресурса развития			
		"до 25-го"	"25-50"	"50-75"	"более 75-го"
2010 г.	618,56	1,6%	5,8%	16,2%	76,4%
2013 г.	831,50	1,5%	5,3%	15,1%	78,1%
2020 г.	940,97	1,4%	5,2%	14,2%	79,2%

Выявленные ситуации взаимосвязанных процессов позволяют провести анализ по двум направлениям. Во-первых, с учетом того, что при взаимосвязанных процессах сумма ограничений базовых моделей равна общему потенциалу развития (общей рыночной нише) всех групп компаний можно оценить, как они изменились за это время. Если взять величину общего ресурса развития в 2010 году (см. табл. 2), то в 2013 году он стал равен 134,4%, а в 2020 году – 152,1%. Во-вторых, на основании соотношений значений ограничений базовых моделей можно оценить, как меняются распределения общего ресурса развития по разным группам компаний. При этом следует обратить внимание на прослеживаемые качественные закономерности изменений ресурсов по каждой группе компаний. При рассмотрении изменений долей ресурсов развития (рыночных ниш) с 2010 по 2020 годы видны устойчивые тенденции уменьшения долей от общего ресурса развития у трех групп компаний, и роста доли только у группы компаний, которые были в 2009 году самыми большими. В период с 2010 по 2020 годы самые крупные компании увеличили свою долю общей рыночной ниши с 76,4 до 79,2 процента. Это увеличение произошло за счет всех остальных групп. Вообще, если представить произошедшие изменения рыночных ниш в процентах, приняв по каждой группе за 100% ресурс развития в 2010 году, то изменения можно выразить следующим образом. Группа «до 25 процентиля» – осталось 84,7% от первоначальной доли общих ресурсов; группа «25-50 процентиль» – осталось 90,1%; группа «50-75 процентиль» 87,8%; группа «более 75 процентиля» – увеличила 103,7%.

Наряду с ситуациями, когда все четыре группы компаний одновременно демонстрируют взаимосвязанную динамику, есть гораздо больше случаев, когда взаимосвязанность проявляется для трех или двух процессов. Если проводить попарные сравнения, используя в качестве основных данные по другим группам, то всегда выявляются взаимосвязанная динамика в 2010 и 2013 годах, и минимум один год в диапазоне 2019-2021 годов. Рассмотрим распределение ресурсов развития при ситуации взаимосвязанной динамики у двух групп средних по размеру компаний, на их динамику уже обращалось внимание при рассмотрении сходящихся траекторий нормированных значений на рис. 2. Результаты расчетов для выявленных взаимосвязанных процессов приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Проценты распределения общего ресурса развития в годы взаимосвязанной динамики для групп средних компаний

Год	"25-50"	"50-75"
2008	24,6%	75,4%
2009	26,2%	73,8%
2010	26,2%	73,8%
2013	26,0%	74,0%
2016	27,1%	72,9%
2018	27,1%	72,9%
2019	27,2%	72,8%
2021	27,7%	72,3%

Как видно из данных табл. 2 суммарная доля в общем ресурсе развития двух средних компаний уменьшается. В тоже время, как показано в табл. 3, проявляется устойчивая тенденция увеличения относительной доли ресурса развития у группы компаний «25-50 процентилей» за счет доли ресурсов развития у группы компаний «50-75 процентилей». Происходящие изменения соотношений ресурсов могут явиться одной из причин к сближению

траекторий выручки этих двух групп, видимое для нормированных значений на рис. 2, отражающих структурные изменения. Но для более глубокого понимания причин необычного изменения траектории выручки группы «50-75 процентилей» необходимо оценить возможные изменения соотношения ресурсов развития еще и с группой «более 75 процентиля». Результаты расчетов для времен взаимосвязанности этих двух процессов в оценках соотношений разделения общего ресурса развития приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕГО РЕСУРСА РАЗВИТИЯ ДЛЯ ГРУПП КОМПАНИЙ С ВЫРУЧКОЙ ВЫШЕ СРЕДНЕЙ

Год взаимосвязанности	"50-75"	"более 75"
2009.	17,6%	82,4%
2010.	17,5%	82,5%
2012.	16,6%	83,4%
2013.	16,2%	83,8%
2015.	16,0%	84,0%
2020.	15,2%	84,8%
2022.	14,3%	85,7%

Как видно из данных табл. 4 существует устойчивая тенденция перехода части ресурса развития группы «50-75 процентилей» в группу более крупных компаний. Таким образом, как это видно из данных табл. 3 и 4 как минимум с 2009 года между компаниями трех групп идет конкурентная борьба за ресурсы развития (рыночные ниши) в результате которой ресурсы развития теряются группой компаний «50-75 процентилей», что и приводит к траектории, представленной на рис. 2. Это сложные структурные изменения.

Рассмотрим ситуации, возникающие в эволюции двух групп малых компаний. Результаты расчетов параметров моделей (2) и (8) по данным о группах «до 25-го процентиля» и «25-50 процентилей» и проверки по критериям взаимосвязанности, показали взаимосвязанность процессов в десяти случаях. Это позволяет провести оценки распределений потенциалов развития между этими группами, результаты оценивания с таких позиций, приведенные в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО РЕСУРСА РАЗВИТИЯ ДЛЯ ГРУПП МАЛЫХ КОМПАНИЙ

Год взаимосвязанности	"до 25-го"	"25-50"
2008.	20,2%	79,8%
2009.	22,1%	77,9%
2010.	22,0%	78,0%
2013.	21,6%	78,4%
2014.	21,7%	78,3%
2016.	20,8%	79,2%
2018.	20,9%	79,1%
2019.	21,3%	78,7%
2020.	21,0%	79,0%
2021.	21,0%	79,0%

Видно, что во времена сильных воздействий на рыночную ситуацию у российских компаний с выручкой в 2009 году меньше медианы, а они составляют половину

от числа всех компаний, возникает конкурентная борьба. Так, в кризисной динамике 2009-2010 годов самые малые компании забрали немного рыночного ресурса у следующих по размеру. Они даже немного выиграли в кризис 2009 года. Малые адаптировались быстрее, но в условиях относительно стабильных экономических ситуаций они уступили часть рыночного ресурса и по сравнению с 2010 годом к 2020 году они проиграли конкурентную борьбу группе компаний «25-50 процентилей».

VIII. Выводы

- Применимые методы позволили выявить глубину и закономерности структурных изменений среди стабильных российских компаний с докризисного времени и посткризисных ситуаций до 2022 года.
- Перед нами картина как могут развиваться стабильные компании, т.к. в целом их суммарные рыночные потенциалы выросли следующим образом. В 2020 он увеличился на 52% по отношению к 2010 году. Причем, за период с 2010 по 2013 годы он вырос на 34,4%, а за более продолжительный период только на 17,7%.
- Структура динамики выручки групп компаний с 2003 по 2022 годы не претерпевала революционных изменений, но, тем не менее, она менялась, а примененные модели обеспечили достаточную точность, чтобы устойчиво выявлять даже малые структурные изменения.
- Модели позволяют выявить области однородной динамики разных вариантов взаимосвязей процессов. В таких ситуациях проявляются устойчивые тенденции изменений ресурсов развития.
- Выявленные неожиданные закономерности изменений распределений рыночных ресурсов развития еще требуют более глубокого экономического анализа и интерпретации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полунин Ю.А., Юданов А.Ю. Метод анализа экономических процессов в условиях нестабильности (на примере анализа динамики выручки российских компаний) // Экономический журнал ВШЭ. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 622-647.
2. Полунин Ю.А., Юданов А.Ю. Темпы роста компаний и заполнение рыночной ниши // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 2. – С. 101-112.
3. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики: Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику. – 8-е изд. – М.: ЛЕНАНД, 2017.
4. Фейгенбаум М.Ж. Универсальность в поведении нелинейных систем: пер. С.Г. Тиходеева // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 141. – Вып. 2. – С. 343-374.
5. Полунин Ю.А. Выявление взаимосвязей нелинейных процессов по эмпирическим данным // Труды XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 2224-2227.

Умножители для ускорителей искусственных нейронных сетей

Буренева Ольга Игоревна

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
oibur@mail.ru

Миронов Сергей Эльмарович

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
semironovspb@yandex.ru

Аннотация. В основе функционирования сверточных нейронных сетей (СНС) лежит операция умножения вектора на матрицу, в связи с чем для построения производительных СНС требуется разработка быстродействующих вычислителей. Рассматриваются варианты ускорения умножителей с использованием методов умножения на группу разрядов, предложены варианты топологических реализаций рассмотренных решений, позволяющие достичь компромисса между быстродействием и площадью кристалла.

Abstract. The operation of convolutional neural networks (CNN) is based on the operation of multiplying a vector by a matrix, which is why the construction of productive CNN requires the development of high-speed computers. The article considers options for accelerating the operation of multipliers using methods of multiplication by a group of digits, and proposes options for topological implementations of the considered solutions, allowing a compromise between performance and crystal area.

Ключевые слова: элементы нейронных сетей, аппаратная реализация нейронных сетей, матричные умножители, умножение на группу разрядов, алгоритм Бута.

Keywords: neural network elements, hardware implementation of neural networks, matrix multipliers, multiplication by a group of digits, Booth algorithm.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проектировании систем искусственного интеллекта реализуются разные способы аппаратной организации вычислений с разным балансом гибкости и производительности [1]. В качестве аппаратной базы могут использоваться классические процессоры с векторными расширениями; графические процессоры, в которых одна инструкция исполняется одновременно на большом количестве арифметических устройств; процессоры потоков данных, состоящие из процессорных элементов, выполняющих простые разнородные операции; матричные ускорители, представляющие собой систолические структуры, выполняющие одинаковые операции.

Матричные ускорители ориентированы на выполнение ограниченного набора операций (как правило это умножение и сложение) и ориентированы в основном на сверточные нейронные сети (СНС). При этом по быстродействию они примерно в 10 раз превышают процессоры потоков данных и в 100 раз кластеры из процессоров общего назначения [1].

Матричное умножение – это хорошо оптимизируемая операция, и с учетом того, что более 90% вычислений в СНС происходит с использованием матричного умножения, задачи, связанные с оптимизацией умножителей, являются актуальными.

Оптимизация матричных ускорителей ведется в двух направлениях. Первое связано с разработкой специфических архитектур матричных ускорителей. В частности, в [2–4] показаны различные варианты матричного ускорителя, учитывающего разреженность нейронной сети; авторы [5–7] предложили архитектуры ускорителей, основанных на приближенных вычислениях, что позволяет оптимизировать быстродействие при реализации арифметических операций; разрабатываются методы вычислений, основанные на использовании памяти [8].

Второе направление предполагает разработку отдельных элементов систолических ускорителей: умножителей и сумматоров, а также их комбинирование. Известны работы, связанные с применением оригинальных методов умножения, например, алгоритма умножения Бута, дерева Уоллеса, ведических умножителей [9–12], а также их модификаций, учитывающих специфику реализуемой нейронной сети. Например, после завершения обучения значения весов определены и вместо традиционного умножения можно выполнять умножение на константу, что упрощает аппаратную реализацию [13].

Реализация систолических ускорителей возможна как на базе FPGA, так и в виде ASIC [14]. Некоторые решения являются универсальными, некоторые учитывают специфику аппаратного воплощения. При этом в обоих случаях может быть выполнена дополнительная оптимизация, за счет особенностей конкретной элементной базы. При реализациях на ПЛИС учитывается архитектура целевого кристалла, и, при минимальных возможностях влияния на результаты трассировки, значительное внимание уделяется анализу характеристик полученного устройства [15, 16].

В случае разработки заказной микросхемы дополнительная оптимизация возможна за счет оригинальной топологической реализации вычислителей [17, 18].

Существует два подхода к реализации вычислений. Один из них предполагает реализацию однотипных действий итерационно на общем для этих операций функциональном блоке. Характерной чертой этого способа вычислений являются низкие аппаратные затраты.

Альтернативой ему является концепция матричных вычислительных устройств (МВУ), обеспечивающая высокое быстродействие благодаря тому, что каждая из однотипных операций выполняется на отдельном индивидуальном устройстве. Поэтому время срабатывания МВУ определяется лишь физическими процессами протекания токов и перезаряда нагрузочных емкостей. Однако обратной стороной такого метода ускорения является большая площадь вычислителя на кристалле. Тем не менее заманчивая перспектива существенного ускорения привела к созданию целого направления, связанного с разработкой МВУ и с исследованием проблемы сокращения их размеров.

В связи с тем, что большую часть МВУ составляют однотипные ячейки, основным из способов уменьшения размеров матричных вычислителей является тщательная детальная проработка их базовых ячеек. Их топология разрабатывается с учетом особенностей взаимного расположения ячеек и их взаимодействия (передачи сигналов между ячейками) в рамках конкретного вычислительного алгоритма, реализуемого аппаратно. В связи с этим можно говорить о данном подходе к разработке, как о пространственной реализации алгоритмов, требующей особой, определяемой конкретным алгоритмом архитектуры и оптимизированных под эту архитектуру специализированных библиотек заказных ячеек, принципиально отличающихся от универсальных библиотек стандартных типовых ячеек.

В работе представлены результаты исследований авторов в области разработки и применения методов быстрого матричного умножения на основе группировки разрядов множителя, проводимых на кафедре вычислительной техники СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» в рамках работ по аппаратному обеспечению высокопроизводительных систем искусственного интеллекта.

II. МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ УМНОЖЕНИЯ

В соответствии с приведённой на рис. 1 структурной схемой матричного умножителя (МУ) его задержка зависит от:

- разрядности N множителя B, определяющей число слагаемых, суммируемых матрицей (число частичных произведений);
- разрядности M множимого A, определяющей число разрядов завершающего сумматора, складывающего выходные сигналы суммы и переноса ячеек старшей строки матрицы.

Разрядность завершающего сумматора можно рассматривать как величину постоянную. И все методы ускорения умножения направлены на ускорение процесса сложения в матрице. Этого можно добиться, распараллелив процесс сложения и (или) сократив число слагаемых.

Разделение процесса сложения частичных произведений на несколько параллельно выполняемых процессов осуществляется в три этапа: разделение частичных произведений на несколько групп; параллельное выполнение сложения в рамках каждой группы; последовательное сложение полученных в группах результатов.

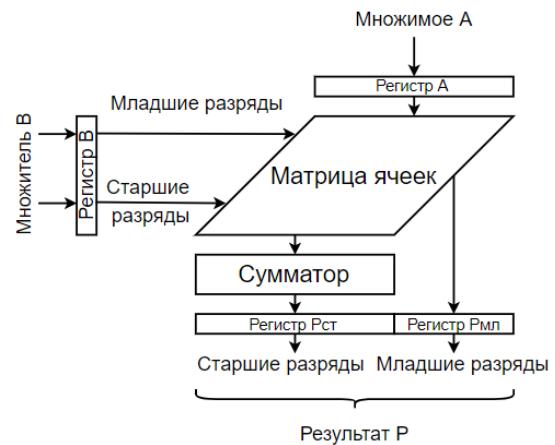


Рис. 1. Структурная схема матричного умножителя (Рст и Рмл соответственно старшие и младшие разряды произведения Р)

Микроэлектронная реализация матричных умножителей с параллельно выполняемым сложением частичных произведений отличается:

- большими аппаратными затратами на организацию связей между параллельно работающими подматрицами;
- более высокой сложностью реализации, вызванной увеличением числа вариантов топологии ячеек.

Наибольшее повышение быстродействия обеспечивается группировкой частичных произведений в соответствии с деревом Уоллеса.

Уменьшение числа суммируемых частичных произведений может быть реализовано посредством умножения в каждой из строк МУ множимого А не на один, а на несколько (K) разрядов множителя B. При этом в базовой ячейке (рис. 2) матрицы вычислителя в качестве элемента умножения будет выступать уже не привычный всем элемент «2И», а мультиплексор.

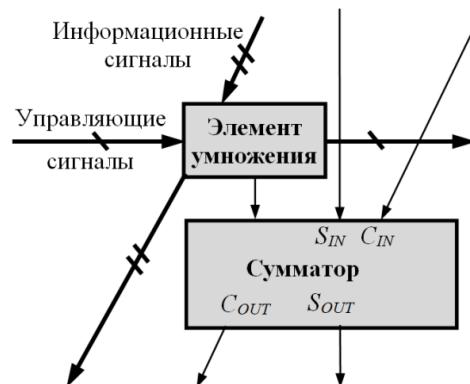


Рис. 2. Базовая ячейка матричного умножителя.
S_{IN} и S_{OUT} – входной и выходной сигналы суммы,
C_{IN} и C_{OUT} – входной и выходной сигналы переноса

При этом управлять работой элемента умножения будет не разряд множителя B, а формируемые на основе группы разрядов множителя управляющие сигналы. Под их воздействием на вход сумматора будет передаваться один из сигналов, поступающих на информационные входы элемента умножения. В качестве таких сигналов будут выступать разряды частичных произведений, кратных множимому A.

Рассмотренные способы ускорения умножения позволяют существенно ускорить процесс вычисления произведения. Их можно применять одновременно. Однако оба они не лишены недостатков. При распараллеливании процесса суммирования частичных произведений в связи с необходимостью организации связей между параллельно работающими подматрицами существенно (кратно) увеличиваются аппаратные затраты и снижается однородность (из-за сложных связей возрастает число модификаций ячеек). Матричные умножители с группировкой разрядов множителя обладают более регулярной структурой и несмотря на усложнение элемента умножения позволяют сократить площадь схемы на кристалле за счет уменьшения числа строк в матрице. Тем не менее группировка разрядов множителя возможна лишь для пар разрядов, о чем речь пойдет в следующем пункте.

III. МАТРИЧНЫЕ УМНОЖИТЕЛИ С ГРУППИРОВКОЙ РАЗРЯДОВ МНОЖИТЕЛЯ

Одновременное умножение на группу разрядов приводит к следующим изменениям в структуре умножителя (рис. 3):

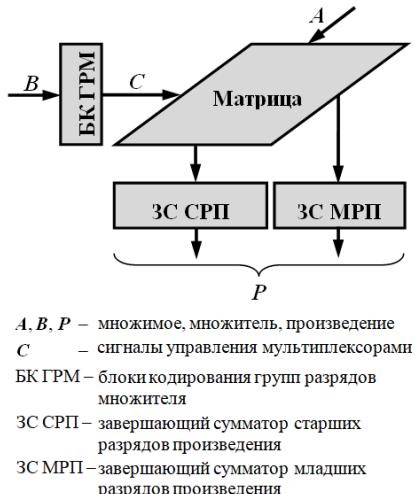


Рис. 3. Структура матричного умножителя с группировкой разрядов множителя

- количество строк в МУ уменьшается пропорционально увеличению количества разрядов множителя, объединяемых в группу;
- количество ячеек в строке по сравнению с традиционным МУ увеличивается на $(k-1)$, где k – число разрядов в группе;
- строки в МУ сдвигаются относительно друг друга на K разрядов;
- в схеме появляется завершающий сумматор младших разрядов произведения;
- в составе МУ появляются блоки кодирования групп разрядов множителя, управляющие работой мультиплексоров.

Первые три изменения очевидны и не требуют комментариев, прокомментируем два последних.

Четвертое изменение вызвано тем, что в связи с увеличением взаимного смещения строк матрицы из сумматоров правых ячеек строк на выход матрицы поступают

не только сигналы суммы, но и сигналы переносов. Для сложения такого двухрядного код и вводится в схему дополнительный завершающий сумматор. Необходимо отметить, что он не должен обладать таким же предельно высоким быстродействием, как и завершающий сумматор старших разрядов произведения. Он должен лишь успеть просуммировать K разрядов за время срабатывания одного матричного сумматора.

Пятое изменение рассмотрим более подробно, так как оно имеет принципиальный характер для данной работы.

Для кодирования групп разрядов множителя было предложено много алгоритмов, наиболее известными из которых являются алгоритмы Бута. В качестве примера на рис. 4 приведена топология матричного умножителя Бута, сгенерированная в системе иерархического сжатия топологии «Matching Of Cells» [19], которая разработана на кафедре вычислительной техники СПб ГЭТУ «ЛЭТИ».

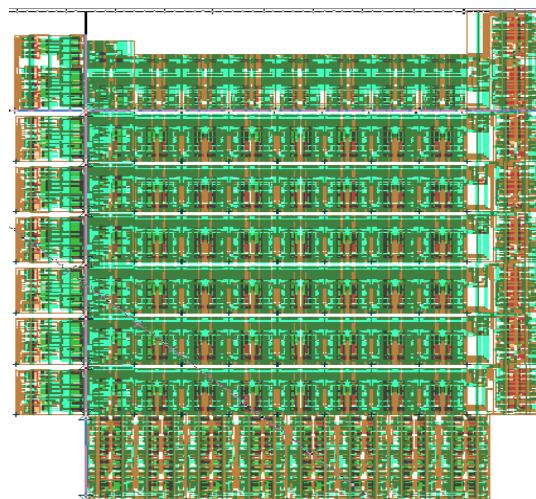


Рис. 4. Топология 16-разрядного матричного умножителя Бута

В соответствии с алгоритмом умножения Бута в группе разрядов множителя в их нормированные значения складываются с нормированным значением переноса из предыдущей (соседней справой) группы разрядов. Полученной сумме ставится в соответствие перенос в следующую (соседнюю слева) группу и «число со знаком», которое представляет собой коэффициент кратности множимому A текущего частичного произведения.

Ограничение на применение данного алгоритма (о чем уже было сказано выше) связано со следующим. Как видно из табл. 1 при группировке двух разрядов множителя коэффициенты кратности частичных произведений множимому A равны степени двойки. Это значит, что подаваемые на информационные входы мультиплексора варианты значений частичных произведений при положительных числах со знаком могут быть получены из множимого без его сдвига или с его сдвигом, а при отрицательных числах со знаком знак может быть учтен съемом инверсного значения с выходов регистра множимого с добавлением единицы в младший разряд.

Однако, как это видно из табл. 2, при группировке более чем двух разрядов числа со знаком уже не будут степенями двойки. А это значит, что частичные произведения уже невозможно получать напрямую из триггеров

регистра множимого. То есть их придется формировать, используя для этого высокоскоростные многоразрядные сумматоры, что приведет как к снижению быстродействия умножителя, так и к увеличению его размера.

ТАБЛИЦА 1. КОДИРОВАНИЕ ПАРЫ РАЗРЯДОВ
В МОДИФИЦИРОВАННОМ АЛГОРИТМЕ УМНОЖЕНИЯ БУТА

B_n	B_{n+1}	C_{in}	Σ	C_{out}	Число со знаком
Вес					
2	1	1	1	4	1
0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	+1
0	1	0	1	0	+1
0	1	1	2	0	+2
1	0	0	2	1	-2
1	0	1	3	1	-1
1	1	0	3	1	-1
1	1	1	4	1	0

ТАБЛИЦА 2. КОДИРОВАНИЕ ТРЕХ РАЗРЯДОВ
В МОДИФИЦИРОВАННОМ АЛГОРИТМЕ УМНОЖЕНИЯ БУТА

B_n	B_{n+1}	B_{n+2}	C_{in}	Σ	C_{out}	Число со знаком
Вес						
4	2	1	1	1	8	1
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	+1
0	0	1	0	1	0	+1
0	0	1	1	2	0	+2
0	1	0	0	2	0	+2
0	1	0	1	3	0	+3
0	1	1	0	3	0	+3
0	1	1	1	4	0	+4
1	0	0	0	4	1	-4
1	0	0	1	5	1	-3
1	0	1	0	5	1	-3
1	0	1	1	6	1	-2
1	1	0	0	6	1	-2
1	1	0	1	7	1	-1
1	1	1	0	7	1	-1
1	1	1	1	8	1	0

Более подробно вопрос построения цифровых фильтров на основе быстродействующих матричных умножителей с группировкой разрядов множителя будет рассмотрен в следующем пункте.

IV. АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УМНОЖЕНИЯ С ГРУППИРОВКОЙ РАЗРЯДОВ МНОЖИТЕЛЯ

При построении цифровых фильтров на основе матричных умножителей с группировкой разрядов множителя базовые ячейки (рис. 2), из которых строятся матрицы будут состоять из сумматора и мультиплексора.

На рис. 5 приведена предложенная Хэмплом (Hampel) [20] схема сумматора, который авторы использовали в своих исследованиях проблемы аппаратной реализации средств искусственного интеллекта. Схему отличают малое время задержки и сравнительно небольшая площадь.

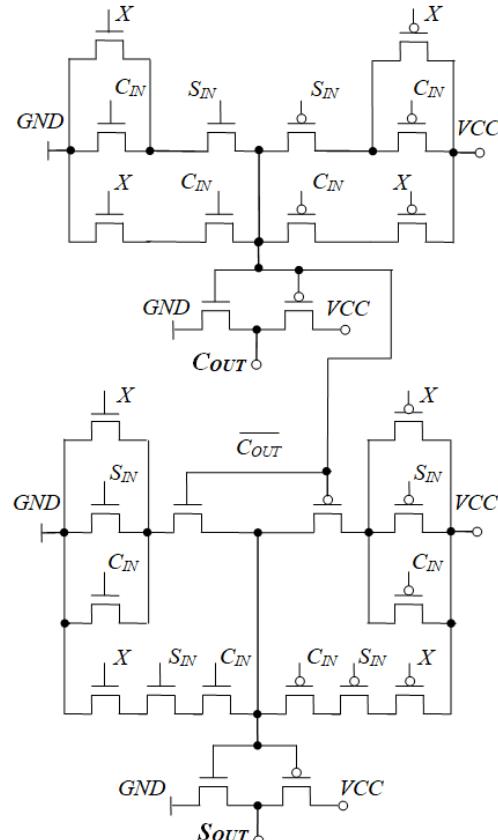


Рис. 5. Схема полного одноразрядного сумматора Хэмпла

Принцип построения схемы мультиплексора иллюстрируется рис. 6. Для реализации функции выбора в схеме используются $2^{K-1}+1$ транзистор, включенные по схеме «Монтажное ИЛИ». Они управляются (2^K+1) управляющими сигналами $\langle C_{-[+2^{K-1}]} \rangle, \langle C_{-[+2^{K-1}-1]} \rangle, \dots, \langle C_{[0]} \rangle, \dots, \langle C_{[-2^{K-1}+1]} \rangle, \langle C_{[-2^{K-1}]} \rangle$, соответствующими числам со знаком (табл. 1 и 2). Эти сигналы (поступающие с блока кодирования по горизонтальным шинам в топологическом слое нижнего металла) пропускают на выходной инвертор I-ый разряд одного из возможных вариантов частичного произведения. Разряды возможных вариантов частичного произведения, лежащих в диапазоне от $\langle -[2^{K-1} \times A] \rangle$ до $\langle +[2^{K-1} \times A] \rangle$, поступают в ячейки матрицы по (2^K+1) шине верхнего металла.

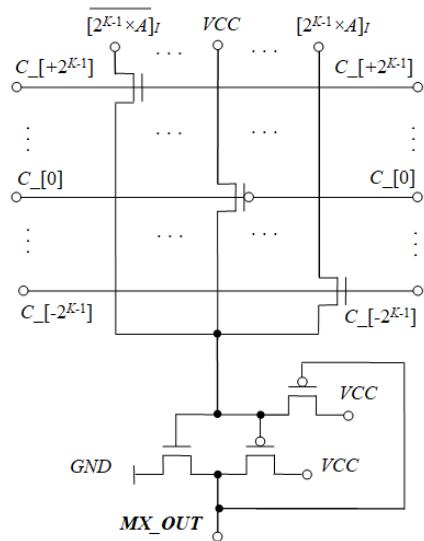


Рис. 6. Схема мультиплексора « (2^k+1) в 1»

Помимо этих магистральных шин в ячейках присутствуют вертикальные шины:

- земли (шина питания «VCC» уже учтена при описании мультиплексора, как шина одного из входных сигналов, после инвертирования преобразующегося в сигнал «0»);
- две шины для передачи между ячейками разных строк сигналов «сумма» и «перенос».

В качестве иллюстрации к сказанному на рис. 7 приведена топология ячейки МУ Бута с группировкой трех разрядов множителя.

Она получена с помощью оригинальных средств генерации [21] и сжатия топологии [19].

V. ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ СТЕРЕНИ ГРУППИРОВКИ РАЗРЯДОВ МНОЖИТЕЛЯ

Как видно из рис. 7 ширина вычислительной части топологии ячейки (сумматора и мультиплексора) совпадает с шириной ее логистических компонентов: пучка вертикальных шин в слое верхнего металла, по которым в ячейки поступают напряжения земли и питания, межстрочные сигналы и разряды возможных вариантов частичного произведения. Поэтому при наращивании разрядности групп до 4, 5, 6 и так далее, когда число шин вариантов частичного произведения увеличивается соответственно в 2, 4, 8 и так далее раз, во избежание возникновения пустот в ячейках, топология их вычислительной части должна быть переработана. Компоненты сумматора и мультиплексора должны быть перегруппированы так, чтобы ширина ячейки увеличилась, а высота соответственно уменьшилась.

Однако, необходимо отметить, что учет одной из особенностей алгоритма умножения позволяет существенно сократить габарит ячеек. В способе кодирования алгоритма Бута коэффициенты кратности частичных произведений множимому (числа со знаком в табл. 1 и 2) принадлежат симметричному относительно нуля диапазону: от $\langle -[2^{k-1} \times A] \rangle$ до $\langle +[2^{k-1} \times A] \rangle$. В связи с этим число шин частичных произведений можно уменьшить в два раза, если ввести в ячейку управляемый инвертор.

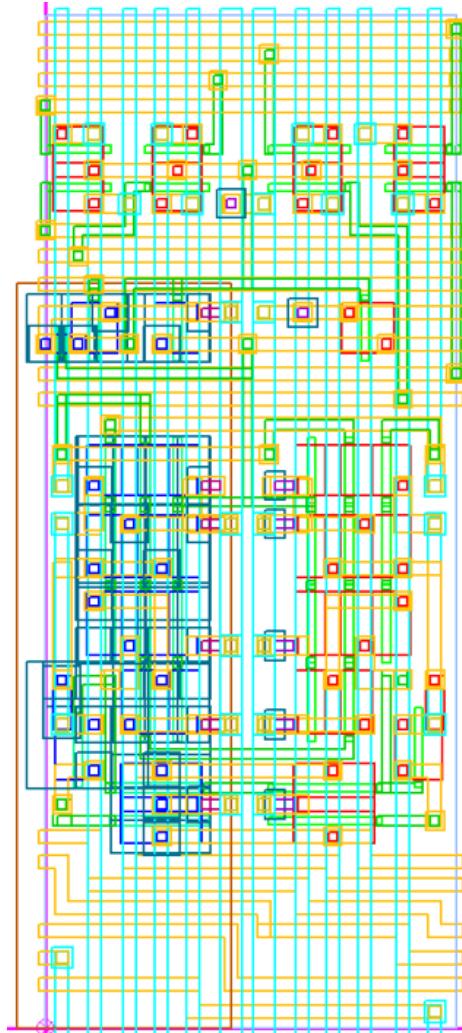


Рис. 7. Топология ячейки матричного умножителя Бута с группировкой трех разрядов множителя

На рис. 8 приведена схема, в которой под управлением сигнала INV на основе разрядов частичных произведений, лежащих в диапазоне от $\langle [1 \times A] \rangle$ до $\langle +[2^{k-1} \times A] \rangle$, формируются разряды частичных произведений, лежащих в диапазоне от $\langle -[2^{k-1} \times A] \rangle$ до $\langle +[2^{k-1} \times A] \rangle$.

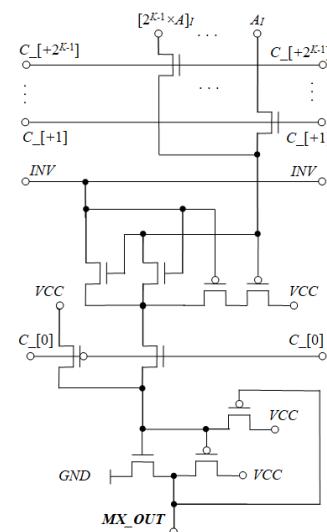


Рис. 8. Схема мультиплексора « (2^k+1) в 1» с управляемым инвертором, под воздействием

Необходимо отметить, что и число горизонтальных шин управления мультиплексором при этом сокращается вдвое, снижая высоту ячеек.

Топология ячейки МУ Бута с группировкой четырех разрядов множителя представлена на рис. 9. Из рисунка видно, что размер ячейки по сравнению с приведенной на рис. 7 ячейкой умножителя с группировкой трех разрядов множителя изменился незначительно: ширина ячейки увеличилась на 3,5%, длина на 9,7%, а площадь на 13,6%.

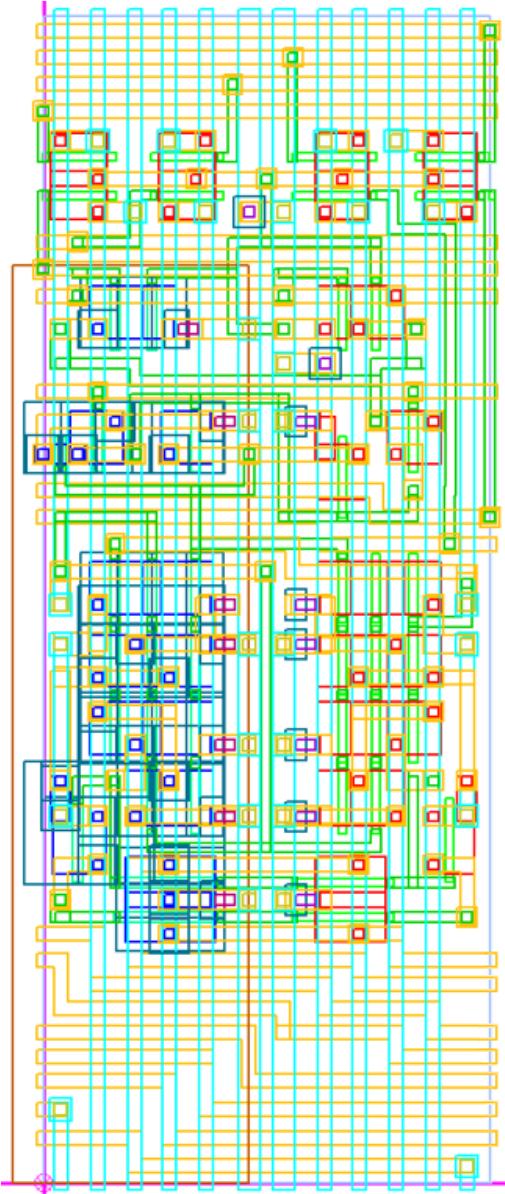


Рис. 9. Топология ячейки МУ Бута с группировкой четырех разрядов множителя

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования вопросов разработки аппаратных средств реализации искусственных нейронных сетей авторы изучили различные способы ускорения работы матричных умножителей. Ориентируясь на специфику их работы в нейронных сетях, авторы предложили эффективный способ их построения, базирующийся на алгоритмах умножения с группировкой разрядов

множителя. Принципиальным отличием разработанного способа от традиционного алгоритма Бута является возможность умножения одновременно более чем на два разряда.

Исследования показали, что применение управляемого инвертирования разрядов кратных множимого позволяет при незначительном увеличении размеров ячейки добиться существенного снижения аппаратных затрат и повышения быстродействия благодаря уменьшению числа строк МУ.

Сейчас на кафедре вычислительной техники СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» продолжаются исследования по применению методов группировки разрядов множителя для ускорения искусственных нейронных сетей, а также ведется разработка кремниевых компиляторов матричных умножителей с использованием оригинальных средств сжатия топологии.

ЛИТЕРАТУРА

- Панчул Ю. Микросхемы нового поколения для ускорения вычислений нейросетей // StorageNews. – URL: <https://www.silicon-russia.com/2019/04/15/triton-skolkovo-robotics-ai/> (дата обращения: 25.07.2024).
- Parashar A., Rhu M., Mukkara A., Puglielli A., Venkatesan R., Khailany B., Emer J., Keckler S.W., Dally W.J. SCNN: An accelerator for compressed-sparse convolutional neural networks // ACM/IEEE 44th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), Toronto, ON, Canada Jun, 24-28 June 2017. – IEEE, 2017. – P. 27-40. – DOI: 10.1145/3079856.3080254.
- Liu B., Chen X., Han Y., Xu H. Swallow: A Versatile Accelerator for Sparse Neural Networks // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2019. – Vol. 39, No. 12. – P. 4881-4893. – DOI: 10.1109/TCAD.2020.2978836.
- Li J., Jiang S., Gong S., Wu J., Yan J., Yan G., Li X. SqueezeFlow: A sparse CNN accelerator exploiting concise convolution rules // IEEE Trans. Comput. – 2019. – Vol. 68, No. 11. – P. 1663-1677. – DOI: 10.1109/TC.2019.2924215.
- Sun P., Yu H., Halak B., Kazmierski, T. A Method for Swift Selection of Appropriate Approximate Multipliers for CNN Hardware Accelerators // 2024 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Singapore, Singapore, 19-22 May 2024. – IEEE, 2024. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ISCAS58744.2024.10558159.
- Lee J., Seo H., Seok H., Kim Y. Novel Approximate Adder Design Using Error Reduced Carry Prediction and Constant Truncation // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 119939–119953. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108443.
- Liu Z., Yazdanbakhsh A., Park T., Esmaeilzadeh H., Kim N.S. SiMul: An Algorithm-Driven Approximate Multiplier Design for Machine Learning // IEEE Micro. – 018. – Vol. 38, No. 4. – P. 50-59. – DOI: 10.1109/MM.2018.043191125.
- Koppula S., Orosa L., Yağlıkçı A.G., Azizi R., Shahroodi T., Kanellopoulos K., Mutlu O. EDEN: Enabling Energy-Efficient, High-Performance Deep Neural Network Inference Using Approximate DRAM // In Proceedings of the 52nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO '52). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019. – P. 166-181. – DOI: 10.1145/3352460.3358280.
- Haider M.H., Ko S.-B. Booth Encoding-Based Energy Efficient Multipliers for Deep Learning Systems // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2023. – Vol. 70, No. 6. – P. 2241-2245. – DOI: 10.1109/TCSII.2022.3233923.
- Farrukh F.U.D. Power Efficient Tiny Yolo CNN Using Reduced Hardware Resources Based on Booth Multiplier and WALLACE Tree Adders // IEEE Open Journal of Circuits and Systems. – 2020. – Vol. 1. – P. 76-87. – DOI: 10.1109/OJCAS.2020.3007334.
- Bureneva O.I., Pavlov A.P. Hardware Implementation of the Multiplier Using Argument Bit Grouping // 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 22–24 May 2024. – IEEE, 2024. – P. 238-241. – DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554181.

12. Mukherjee B. A comprehensive review on low power fixed width digital multiplier architectures // Journal of Mechanics of continua and Mathematical sciences. – 2024. – Vol. 19, No. 7. – P. 59-76.
13. Bureneva O., Mironov S. Fast FPGA-Based Multipliers by Constant for Digital Signal Processing Systems // Electronics. –2023. – Vol. 12. – P. 605. – DOI: 10.3390/electronics12030605.
14. Nurvitadhi E., Jaewoong S., Sheffield D., Mishra A., Krishnan S., Marr D. Accelerating Binarized Neural Networks: Comparison of FPGA, CPU, GPU, and ASIC // International Conference on Field-Programmable Technology (FPT), Xi'an, China, 07–09 December 2016. – IEEE, 2016. – P. 77-84. – DOI: 10.1109/FPT.2016.7929192.
15. Chamberlin A., Gerber A., Palmer M., Goodale T., Gundi N.D., Chakraborty K., Roy S. Understanding Timing Error Characteristics from Overclocked Systolic Multiply–Accumulate Arrays in FPGAs // J. Low Power Electron. – 2024. – Vol. 14, No 4. – DOI: 10.3390/jlpea14010004.
16. Шуплецов М.С., Жуков В.В., Грибок С.В., Ганусов И., Местецкий М.А., Лопунов М.А., Купраш Е.Д. Точный синтез умножителей малой точности для ПЛИС корпорации Intel // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), РФ. Москва, март–ноябрь 2022. – Вып. 3. – С. 212-218. – DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-212-218.
17. Machupalli R., Hossain M., Mandal M. Review of ASIC accelerators for deep neural network // Microprocessors and Microsystems. – 2022. – Vol. 89. – DOI: 10.1016/j.micpro.2022.104441.
18. Mironov S.E., Bureneva O.I., Milakin A.D. Analysis of Multiplier Architectures for Neural Networks Hardware Implementation // III International Conference on Neural Networks and Neurotechnologies (NeuroNT), Russia, Saint Petersburg, 16 June 2022. – IEEE, 2022. – DOI: 10.1109/NeuroNT55429.2022.9805564.
19. Mironov S.E., Vasilyev A.Yu., Safyannikov N.M. Means Of Automating The Hierarchical Design Of Complex Microelectronic Circuits With Uncertainty Of Design Rules // Problems of advanced micro- and nanoelectronic systems development (MES). SELECTED ARTICLES of the VIII All-Russia Science&Technology Conference MES-2018. Moscow: – FSFIS Institute for Design Problems in Microelectronics RAS. 2019. – P. 7-13. – DOI: 10.31114/2078-7707-2019-1-7-13.
20. Hamble D., McGuire K.E., Prost K.J. CMOS/SOS serial-parallel multiplier // IEEE journal of solid-state circuits, 1975. – Vol. SC-10, No. 5. – P. 307-314.
21. Миронов С.Э., Андреев Л.Е., Зибарев К.М. Технология комплексной параметризации топологических проектов регулярных макроблоков СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2020. – Вып. 3. – С. 35-40. – DOI: 10.31114/2078-7707-2020-3-35-40

Вычислительная модель и биоэвристика коллективного поведения агентов

Родзин Сергей Иванович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
srodzin@sedu.ru

Аннотация. Целью исследования является разработка эффективного алгоритма поиска оптимальных решений. Предлагается вычислительная модель коллективного поведения агентов и алгоритм дифференциально-векторного движения. Модель основана на паттернах поведения группы животных с использованием коллективной памяти. Алгоритм тестируется на многомерных функциях. Результаты сравниваются с конкурирующими алгоритмами и проверяются с использованием Т-критерия суммы рангов Уилкоксона. Алгоритм показал преимущество по времени и точности найденных решений.

Abstract. The purpose of the study is to develop an effective algorithm for finding optimal solutions. A computational model of the collective behavior of agents and an algorithm of differential vector motion are proposed. The model is based on patterns of behavior of a group of animals using collective memory. The algorithm is tested on multidimensional functions. The results are compared with competing algorithms and verified using the Wilcoxon rank sum T-test. The algorithm showed an advantage in terms of time and accuracy of the solutions found.

Ключевые слова: биоэвристика, глобальная оптимизация, дифференциально-векторное движение, память, многомерная функция, агент, оператор, популяция, критерий Уилкоксона.

Keywords: bioheuristics, global optimization, differential vector motion, memory, multidimensional function, agent, operator, population, Wilcoxon criterion.

I. ВВЕДЕНИЕ

Перспективным решением задач поиска глобального оптимума являются биоэвристики, представляющие собой недетерминированные алгоритмы, исследующие пространство поиска, решений, обучающиеся в процессе поиска, не привязанные к конкретной задаче, хотя и не гарантирующие точное решений. Здесь природа выступает источником концепций, механизмов и принципов проектирования интеллектуальных технических систем для решения сложных задач управления и глобальной оптимизации.

В настоящее время известно свыше 500 биоэвристик [3]. Наиболее цитируемыми являются роевой алгоритм (Particle Swarm Optimization, PSO), генетический алгоритм (Genetic Algorithm, GA), алгоритм дифференциальной эволюции (Differential Evolution, DE) и алгоритм гравитационного поиска (Gravity Search Algorithm, GSA) [4].

В большинстве биоэвристик для моделирования коллективного поведения агентов используются их индивидуальные паттерны поведения. Примерами являются сеть муравьиных феромонных следов, танцы пчел-разведчиков, миграция рыбных косяков [3]. Однако при моделировании не учитывается существование коллективной памяти агентов.

В докладе рассматривается биологическая и вычислительная модель коллективной памяти группы агентов, а также предлагается эффективная биоэвристика для решения прикладных задач глобальной оптимизации. В биоэвристике поисковые агенты взаимодействуют друг с другом на основе простых поведенческих правил, реализуемых в виде математических операторов. Операторы применяются к каждому агенту с учетом того, что вся группа имеет общую память, в которой хранятся их собственные лучшие позиции. Подход сопоставляется с известными биоэвристиками, а получаемые результаты свидетельствуют об эффективности алгоритма.

II. БИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ АГЕНТОВ

A. Биологическая модель

Паттерны коллективного поведения таких организмов, как муравьи, рыбы, птицы уже давно привлекали внимание натуралистов и ученых. Однако несмотря на долгую историю научных исследований, связь между индивидуальными и групповыми паттернами поведения агентов начала устанавливаться не так давно [41]. Например, агенты в группе часто вынуждены быстро принимать решение о направлении движения в неопределенной и опасной среде. Группа может состоять из агентов, имеющих различный статус и не осведомленных о состоянии других индивидов или об угрозе. В соответствии с принципом конкуренции и доминирования группа может иметь иерархическую структуру. В [5] установлено, что такая структура приводит к более стабильным группам с лучшими свойствами сплоченности среди агентов. Повторяющиеся взаимодействия в группе масштабируются до коллективного поведения и принятия решений в широком диапазоне типов групп агентов. Даже среди людей в определенных обстоятельствах имеют место быть сходные паттерны поведения. При этом коллективное принятие решений имеет существенную черту – общую память.

Несмотря на разнообразие передвижений группы агентов, многие из коллективных паттернов порождаются простыми правилами, которым следуют отдельные агенты группы: (1) удерживать текущую позицию; (2) двигаться в направлении к ближайшим соседям или, наоборот, от ближайших соседей; (3) двигаться случайным образом; (4) конкурировать за определенную позицию. Выбор правила определяется в соответствии с внутренней мотивацией агента.

Однако существование коллективной памяти в группе агентов влияет на коллективное поведение. Так в коллективной памяти может храниться информация о местоположении управляющих агентов или направлении движения группы. Это открывает возможности для моделирования сложного коллективного поведения группы, используя простые индивидуальные правила и общую память. В этой работе при построении алгоритма коллективного поведения агентов используется поведенческая модель, позволяющая определить новые операторы поиска оптимального решения. Также используется коллективная память для хранения лучших позиций агентов (лучших решений) с учетом механизмов конкуренции и подчинения в группе.

B. Алгоритм коллективного поведения агентов (АКПА)

Алгоритм АКПА предполагает наличие набора операторов, реализующих правила взаимодействия и коллективного поведения агентов. Каждое решение в пространстве поиска оптимума представляет собой позицию агента. В общей памяти хранятся наилучшие решения в каждом поколении (\mathbf{M}_g) и наилучшие решения в течение всех предыдущих поколений (\mathbf{M}_h).

Алгоритм АКПА является итерационным, начинается со случайной инициализации популяции решений и определения наилучшей позиции в группе. Затем применяются операторы алгоритма пока не будет выполнен критерий остановки. Критерием остановки является заранее заданное число итераций N_I . АКПА относится к классу алгоритмов дифференциально-векторного движения, характерной чертой которых является использование механизмов рекомбинации имеющихся репрезентативных решений для создания новых решений [6]. Операторы алгоритма реализуют передвижения агентов относительно ближайших соседей, случайные передвижения, а также обновление общей памяти.

Рассмотрим основные операторы алгоритма АКПА подробнее.

1) Инициализация популяции

Алгоритм начинается с инициализации позиций популяции агентов $\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_{N_p}\}$, где N_p – размер популяции. Каждая позиция агента \mathbf{a}_i представляет собой D -мерный вектор, содержащий значения параметров, подлежащих оптимизации. Эти значения случайным образом и равномерно распределяются между заранее заданной начальной нижней и верхней границей j -го параметра a_j^{low} и a_j^{high} соответственно:

$$a_{i,j} = a_j^{low} + rand(0,1) \cdot (a_j^{high} - a_j^{low}). \quad (1)$$

Здесь $a_{i,j}$ – это j -й параметр i -го агента, $j=1..D$, $i=N_p$.

Все начальные позиции \mathbf{A} сортируются в соответствии с фитнес функцией приспособленности (доминирования) для формирования новой популяции $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{N_p}\}$ с последующим сохранением в памяти наилучших решений в каждом поколении (\mathbf{M}_g) и наилучших решений в течение всех предыдущих поколений (\mathbf{M}_h).

2) Определение наилучшей позиции в популяции

В процессе определения наилучшей позиции генерируются первые B в $\{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_B\}$ новых позиций агентов популяции \mathbf{A} . Эти позиции вычисляются с учетом значений, содержащихся в памяти всех предыдущих поколений \mathbf{M}_h , с небольшим случайным возмущением вокруг них:

$$\mathbf{a}_l = \mathbf{m}_h^l + \mathbf{v}, \quad (2)$$

где $l \in \{1, 2, \dots, B\}$, \mathbf{m}_h^l – l -й элемент памяти \mathbf{M}_h , \mathbf{v} – случайный вектор малой длины.

3) Оператор передвижения относительно ближайших соседей

Согласно биологической метафоре, агенты в соответствии с внутренней мотивацией случайно сближаются или отдаляются от ближайших соседей. Необходимы новые операторы, моделирующие такой биологический паттерн. С этой целью генерируется случайное число r в диапазоне $[0, 1]$. Если r не больше некоторого порогового значения H , то индивидуальная позиция агента перемещается (ближается или отдаляется) относительно ближайшей наилучшей позиции из \mathbf{M}_h , иначе – перемещается к ближайшей наилучшей позиции из \mathbf{M}_g :

$$\mathbf{a}_i = \begin{cases} \mathbf{x}_i \pm r \cdot (\mathbf{m}_h^{\text{ближ}} - \mathbf{x}_i), & \text{если } r \leq H \\ \mathbf{x}_i \pm r \cdot (\mathbf{m}_g^{\text{ближ}} - \mathbf{x}_i), & \text{если } r > H \end{cases}, \quad (3)$$

где $i \in \{B+1, B+2, \dots, N_p\}$, $\mathbf{m}_h^{\text{ближ}}$ и $\mathbf{m}_g^{\text{ближ}}$ – ближайшие наилучшие позиции из \mathbf{M}_h и \mathbf{M}_g для \mathbf{x}_i .

4) Оператор случайного передвижения

Следуя биологической модели, один агент с некоторой вероятностью P случайным образом изменяет свою позицию. Это поведенческое правило реализуется с учетом следующего выражения:

$$\mathbf{a}_i = \begin{cases} \mathbf{r} \text{ с вероятностью } P \\ \mathbf{x}_i \text{ с вероятностью } (1 - P) \end{cases}, \quad (4)$$

где $i \in \{B+1, B+2, \dots, N_p\}$, \mathbf{r} – случайный вектор, определяемый в пространстве поиска. Этот оператор аналогичен повторной инициализации агента в случайной позиции, как это указано в (1).

5) Обновление общей памяти

После выполнения операторов определения наилучшей позиции в популяции, передвижения относительно ближайших соседей и случайного передвижения для всех N_p агентов, необходимо обновить память \mathbf{M}_h .

Чтобы актуализировать \mathbf{M}_h , используется механизм доминирования. Агенты, взаимодействующие внутри группы, поддерживают между собой минимальную дистанцию r . Эта дистанция зависит от того, насколько агрессивно ведет себя агент. Следовательно, когда два агента противостоят друг другу на таком расстоянии, преобладает наиболее доминирующая особь тем временем другие агенты удаляются.

В алгоритме АКПА память \mathbf{M}_h обновляется согласно следующей процедуры:

- элементы \mathbf{M}_h и \mathbf{M}_g объединяются: $\mathbf{M}_U = \mathbf{M}_h \cup \mathbf{M}_g$;
- каждый элемент $\mathbf{m}_U^i \in \mathbf{M}_U$ сравнивается попарно с оставшимися элементами памяти $\{\mathbf{m}_U^1, \mathbf{m}_U^2, \dots, \mathbf{m}_U^{2B-1}\}$. Если расстояние между сравниваемыми элементами меньше ρ , то преимущество получает элемент с лучшим значением фитнес-функции, а другой удаляется;
- из полученных на предыдущем шаге элементов \mathbf{M}_U выбирается наилучшее значение B для построения нового \mathbf{M}_h .

Значение ρ влияет на скорость сходимости алгоритма и время вычислений, поэтому параметр ρ вычисляется с учетом следующего уравнения:

$$\rho = \frac{\prod_{j=1}^D (a_j^{high} - a_j^{low})}{10 \cdot D}, \quad (5)$$

где a_j^{high} и a_j^{low} представляют собой предварительно заданные нижнюю и верхнюю границы j -го параметра соответственно в D -мерном пространстве.

Ниже представлено пошаговое описание алгоритма АКПА.

C. Шаги алгоритма АКПА

Шаг 1 Установка параметров N_p , B , H , P и NI .

Шаг 2 Случайная инициализация позиций популяции агентов $\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_{N_p}\}$ согласно (1).

Шаг 3 Сортировка позиций \mathbf{A} в соответствии с фитнес функцией для формирования новой популяции $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{N_p}\}$ с последующим сохранением в памяти наилучших решений в каждом поколении \mathbf{M}_g и наилучших решений в течение всех предыдущих поколений \mathbf{M}_h .

Шаг 4 Выбор первых B позиций из \mathbf{A} и сохранение их в памяти \mathbf{M}_g .

Шаг 5 Обновление \mathbf{M}_h (на первой итерации $\mathbf{M}_h = \mathbf{M}_g$).

Шаг 6 Вычисление первых позиций B новой популяции решений $\mathbf{A} = \{\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_B\}$ согласно (2).

Шаг 7 Вычисление остальных элементов, используя операторы передвижения относительно ближайших соседей и случайного передвижения:

```

for i=B+1:N_p
  if (r_i < P) then
    оператор передвижения относительно ближайших соседей
    {
      if (r_2 < H) then
        a_i = x_i ± r · (m_hближайший - x_i)
      else if
        a_i = x_i ± r · (m_gближайший - x_i)
      }
    else if
      оператор случайного передвижения
      {
        a_i = r
      }
    end for (r_1, r_2 ∈ rand(0,1))
  
```

Шаг 8 Если условие останова NI выполнено, то алгоритм завершается; иначе – возврат к шагу 3.

Наилучшее значение в \mathbf{M}_h представляет глобальное решение задачи оптимизации.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для оценки эффективности представленного алгоритма использовался набор из 7 тестовых функций, представленных в [7], где приводится описание нескольких десятков унимодальных и мультиэкстремальных функций, а также результаты их тестирования различными биоэвристиками для многомерных задач глобальной оптимизации:

- $f_1(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n x_i^2, x_i \in [-100; 100]^n, f_{opt} = 0$;
- $f_2(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n |x_i| + \prod_{i=1}^n |x_i|, x_i \in [-10; 10]^n, f_{opt} = 0$;
- $f_3(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2, x_i \in [-100; 100]^n, f_{opt} = 0$;
- $f_4(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i-1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2], x_i \in [-30; 30]^n, f_{opt} = 0$;
- $f_5(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{|x_i|}), x_i \in [-500; 500]^n, f_{opt} = -418,98*n$;
- $f_6(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10], x_i \in [-5, 12; 5, 12]^n, f_{opt} = 0$;
- $f_7(\mathbf{X}) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right), x_i \in [-600; 600]^n, f_{opt} = 0$.

Здесь n – размерность функции (n устанавливалась равной 30), f_{opt} – минимальное значение функции.

Чтобы продемонстрировать эффективность, а также вычислительные характеристики предложенного алгоритма создана программная среда на языке программирования C#. Тестирование проводилось на персональном компьютере с процессором Intel Core i7 с ОЗУ-8 Гб в среде Windows 10.

В начале для исследования влияния параметров P и H на результивность алгоритма были протестированы четыре функции: f_1 , f_3 , f_4 , f_7 . При этом максимальное число итераций $NI = 1000$, размер популяции $N_p = 50$, $B = 10$. Поиск глобального минимума для каждой из функций проводился 30 раз.

В табл. 1 представлены результаты экспериментов по алгоритму АКПА: наилучшие значения для каждой функции μ и дисперсия σ^2 , усредненные за 30 прогонов при фиксированном значении параметра $H = 0,8$ и изменении P от 0,5 до 0,9 с шагом 0,1.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ АКПА С РАЗЛИЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ПАРАМЕТРА P ДЛЯ ФУНКЦИЙ f_1 , f_3 , f_4 , f_7 ПРИ $H = 0,8$

Функция	f_1	f_3	f_4	f_7
$P=0,5; \mu(\sigma^2)$	2,63·E-11 2,13·E-12 ^a	5,71·E-13 1,11·E-14	5,68·E-11 2,21·E-12	1,57·E-2 1,25·E-3
$P=0,6; \mu(\sigma^2)$	1,98·E-17 6,51·E-18	7,78·E-19 1,52·E-20	1,54·E-17 1,68·E-18	1,14·E-6 3,71·E-7
$P=0,7; \mu(\sigma^2)$	1,28·E-23 3,54·E-24	4,47·E-27 3,60·E-28	5,11·E-22 4,42·E-23	2,81·E-8 5,21·E-9
$P=0,8; \mu(\sigma^2)$	2,33·E-29 4,41·E-30	7,62·E-31 4,23·E-32	9,02·E-28 6,77·E-29	4,21·E-10 4,87·E-11
$P=0,9; \mu(\sigma^2)$	4,53·E-23 5,12·E-24	3,42·E-26 3,54·E-27	4,77·E-20 1,94·E-21	4,58·E-4 6,92·E-5

В табл. 2 представлены результаты экспериментов по алгоритму АКПА: наилучшие значения для каждой функции μ и дисперсия σ^2 , усредненные за 30 прогонов при фиксированном значении параметра $P = 0,8$ и изменении H от 0,5 до 0,9 с шагом 0,1.

Для наглядности наилучшие результаты выделены шрифтом. Результаты свидетельствуют о том, что правильное сочетание различных значений параметров повышает точность решения.

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АКПА С РАЗЛИЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ПАРАМЕТРА H ДЛЯ ФУНКЦИЙ F_1, F_3, F_4, F_7 ПРИ $P = 0,8$

Функция	f_1	f_3	f_4	f_7
$H=0,5; \mu(\sigma^2)$	$2,23 \cdot 10^{-10}$ $8,92 \cdot 10^{-11}$ ^a	$5,70 \cdot 10^{-10}$ $5,12 \cdot 10^{-11}$	$8,80 \cdot 10^{-9}$ $5,55 \cdot 10^{-10}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$ $2,16 \cdot 10^{-5}$
$H=0,6; \mu(\sigma^2)$	$3,35 \cdot 10^{-18}$ $3,21 \cdot 10^{-19}$	$3,24 \cdot 10^{-18}$ $1,32 \cdot 10^{-19}$	$6,72 \cdot 10^{-21}$ $1,11 \cdot 10^{-22}$	$2,89 \cdot 10^{-6}$ $6,43 \cdot 10^{-7}$
$H=0,7; \mu(\sigma^2)$	$3,85 \cdot 10^{-22}$ $6,78 \cdot 10^{-23}$	$6,29 \cdot 10^{-27}$ $8,26 \cdot 10^{-28}$	$1,69 \cdot 10^{-23}$ $1,34 \cdot 10^{-24}$	$2,36 \cdot 10^{-7}$ $3,75 \cdot 10^{-8}$
$H=0,8; \mu(\sigma^2)$	$2,33 \cdot 10^{-29}$ $4,41 \cdot 10^{-30}$	$7,62 \cdot 10^{-31}$ $4,23 \cdot 10^{-32}$	$9,02 \cdot 10^{-28}$ $6,77 \cdot 10^{-29}$	$4,21 \cdot 10^{-10}$ $4,87 \cdot 10^{-11}$
$H=0,9; \mu(\sigma^2)$	$4,72 \cdot 10^{-21}$ $6,29 \cdot 10^{-22}$	$5,41 \cdot 10^{-22}$ $5,28 \cdot 10^{-23}$	$7,39 \cdot 10^{-21}$ $4,41 \cdot 10^{-22}$	$3,02 \cdot 10^{-4}$ $4,37 \cdot 10^{-6}$

Сравнение производительности АКПА на 7 тестовых функциях производилось с результатами, полученными с помощью генетического алгоритма (GA) [8], алгоритма роя частиц (PSO) [6], алгоритм гравитационного поиска (GSA) [9] и алгоритма дифференциальной эволюции (DE) [10]. Для корректного сравнения устанавливались одни и те же общие параметры управления: размер популяции $N_p = 50$, максимальное число итераций $NI = 1000$.

Настройки параметров для каждого из конкурирующих алгоритмов соответствовали оригиналым работам:

- согласно [8] GA использует арифметический кроссовер, гауссовскую мутацию и селекцию колеса рулетки. Вероятности операторов кроссинговера и мутации были установлены на 0,3 и 0,1 соответственно;
- в алгоритме PSO устанавливались параметры $c_1 = c_2 = 2$, а коэффициент инерции (ω) линейно уменьшается от 0,9 до 0,2;
- в алгоритме GSA параметры $G_0 = 100$, $\alpha = 20$; $T = 1000$. В [9] эти значения были установлены в качестве наилучших;
- в алгоритме DE согласно [10] вероятность кроссинговера равна 0,9, а весовой коэффициент F равен 0,8.

Результаты сравнения алгоритма АКПА с конкурирующими алгоритмами GA, PSO, GSA, DE на тестовых функциях $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7$ приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ АКПА В СРАВНЕНИИ С АЛГОРИТМАМИ GA, PSO, GSA, DE

Функция	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
GA	av 23,13	1,07	$5,6E3$	$1,1E3$	-1E4	5,90	1,16
	med 21,87	1,13	$5,5E3$	$1,0E3$	-1E4	5,71	1,14
PSO	av 1,8E-3	2,0	$4,1E-3$	$3,6E4$	$-9,8E3$	$55,1$	0,01
	med 1,2E-3	$2E-3$	$2,2E-3$	$1,7E3$	$-9,2E3$	56,6	0,008
GSA	av 7E-11	$4E-5$	$0,2E3$	$25,16$	$-2,8E3$	15,3	0,29
	med 6E-11	$5E-5$	$0,2E3$	$25,18$	$-2,6E3$	14,6	0,04
DE	av 11,21	0,95	0,12	0,25	$-4E3$	30,1	$1E-3$
	med 13,21	1,05	0,09	0,31	$-4E3$	31,4	$1E-3$
АКПА	av $2E-29$	0	$8E-31$	$9E-28$	$-1E4$	$1E-3$	0
	med $1E-20$	0	$1E-19$	$3E-18$	$-1E4$	$7E-4$	0

Сравнение проводилось по показателям среднее наилучшее значение функции (av) и медиана наилучшего значения функции на последней итерации (med). Наилучший результат для каждой функции выделен шрифтом.

Согласно табл. 3 АКПА показал лучшие результаты, нежели конкурирующие алгоритмы GA, PSO, GSA и DE на всех семи тестовых функциях. Это объясняется лучшим балансом АКПА между скоростью сходимости и диверсификацией пространства поиска решений.

Также оценивалась статистическая значимость полученных результатов. С этой целью применялся Т-критерий суммы рангов Уилкоксона [11] для независимых выборок, найденных каждым из сравниваемых алгоритмов на 30 тестовых запусках, при уровне значимости 5 %. Значение $T < 0,05$ рассматривалось как адекватное доказательство против нулевой гипотезы, которая отвергается. Предложенный алгоритм АКПА превосходит конкурирующие, а экспериментальные результаты по алгоритму являются статистически значимыми.

Также проводилось сравнение с одним из наиболее эффективных алгоритмов непрерывной оптимизации BFGS – квазиньютоновским итерационным алгоритмом численной оптимизации, предназначенным для нахождения локального экстремума нелинейного функционала без ограничений [12]. Эксперименты проводились в MatLab.

В первом эксперименте сравнивалась производительность алгоритмов BFGS и АКПА на унимодальной функции. В унимодальных функциях глобальный минимум совпадает с локальным минимумом. BFGS имеет высокую скорость локальной сходимости, которая зависит от размерности задачи. В качестве эталона для сравнения была выбрана гладкая и дифференцируемая функция Розенброка (f_5).

В эксперименте оба алгоритма BFGS и АКПА решали задачу минимизации функции f_5 при различной размерности функции. Для реализации BFGS в качестве исходной матрицы принималась $B_0 = I$ (первый шаг эквивалентен градиентному спуску). В качестве показателей эффективности сравнения рассматривались время решения и число итераций для достижения минимума. Для BFGS в качестве условия остановки алгоритма принималось $\|g_5(X)\| \leq 1E-6$, где $g_5(X)$ является градиентом $f_5(X)$. Для АКПА критерием остановки является условие, когда больше не происходят изменения в памяти M_h .

В табл. 4 представлены результаты обоих алгоритмов с учетом следующих размерностей функции f_5 : $n \in \{2; 10; 30; 50; 70; 100; 120\}$.

ТАБЛИЦА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ АЛГОРИТМА BFGS И АЛГОРИТМА АКПА НА МНОГОМЕРНОЙ ФУНКЦИИ РОЗЕНБРОКА $F_5(X)$

n	$t_{cp}(c)$		IN _{cp}	
	BFGS	АКПА	BFGS	АКПА
2	0,15	4,21	6	89
10	0,55	5,28	22	98
30	1,35	5,44	41	108
50	2,77	5,88	68	112
70	4,23	6,11	93	115
100	5,55	6,22	105	121
120	6,64	6,71	125	129

Для обеспечения согласованности результатов учитывались два показателя: среднее затраченное время (t_{cp}) и среднее число итераций (IN_{cp}) после 30 прогонов алгоритмов.

Из табл. 4 видно, что алгоритм BFGS превосходит АКПА по показателям t_{cp} и IN_{cp} при небольших значениях размерности функции. Однако при размерности функции $f_5(X)$, начиная с $n \geq 70$, результаты по алгоритму АКПА сопоставимы с результатами BFGS. Тот факт, что алгоритм BFGS превосходит предлагаемый алгоритм АКПА, нельзя рассматривать как его недостаток, учитывая ограничения, накладываемые на функции методом BFGS.

В случае решения задачи глобальной оптимизации мультиэкстремальной функции алгоритм BFGS попадает в ловушку локальных оптимумов. Это ограничивает его применение для решения задач глобальной оптимизации. Одним из наиболее широко используемых для решения задач глобальной оптимизации является метод мультистарта (MS) [13]. В MS в качестве исходного решения случайным образом выбирается точка из допустимой области, а затем из нее запускается алгоритм непрерывной оптимизации. Затем процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто значение, близкое к глобальному оптимуму.

Во втором эксперименте сравнивалась производительность MS и АКПА на мультимодальных функциях $f_6(X)$ и $f_7(X)$. Сравнение проводилось по показателям среднее затраченное время (t_{cp}), среднее число итераций (IN_{cp}) и среднее наилучшее значение функции (av) после 30 прогонов алгоритмов. Результаты сравнения приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ АЛГОРИТМА MS И АЛГОРИТМА АКПА НА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ФУНКЦИЯХ $F_6(X)$ И $F_7(X)$ ПРИ $N = 30$

Функция	MS			АКПА		
	t_{cp}	IN_{cp}	av	t_{cp}	IN_{cp}	av
2	45,4	23,3	1,2E-2	10,2	633	1,0E-3
10	72,1	102,3	4,51E-10	15,8	884	1,1E-13

Из табл. 5 видно преимущество АКПА перед MS по времени и точности найденных решений.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена биоэвристика для решения прикладных задач глобальной оптимизации, основанная на вычислительной модели коллективного поведения группы агентов, взаимодействующих между собой на основе простых поведенческих правил, реализуемых в виде математических операторов и имеющих общую память.

Алгоритм был экспериментально протестирован на множестве из семи одномодальных и мультимодальных функций. Его производительность сравнивалась с генетическим алгоритмом, алгоритмом роя частиц, алгоритмом гравитационного поиска и алгоритмом дифференциальной эволюции. Эксперименты показали, что предлагаемый алгоритм в целом превосходит конкурирующие алгоритмы по всем тестовым функциям, а полученные результаты являются статистически значимыми. Сравнение предлагаемой биоэвристики с одним из наиболее эффективных алгоритмов непрерывной оптимизации BFGS на унимодальной функции с размерностью от $n = 2$ до $n = 120$ показало, что BFGS превосходит АКПА

при небольших значениях размерности, однако, начиная с $n = 70$, их результаты становятся сопоставимыми при том, что на функции, оптимизируемые алгоритмом АКПА, не накладывается ограничений, в отличие от BFGS. Сравнение АКПА с методом мультистарта на мультимодальных функциях также показывает его преимущество по времени и точности найденных решений.

Результаты, в основном, обусловлены двумя причинами:

- операторы, моделирующие биологические паттерны поведения позволяют лучше исследовать пространство поиска оптимума;
- мультимодальной оптимизации не только сохраняется разнообразие решений, содержащихся в памяти M_h , но даже увеличивается за счет реализации принципа конкуренции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00089, <https://rscf.ru/project/23-21-00089/> в Южном федеральном университете.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dragoi E.N., Dafinescu V. Review of Metaheuristics Inspired from the Animal Kingdom // Mathematics. – 2021. – No. 9. – P. 2335. – DOI: 10.3390/math9182335.
2. Bonyadi M., Michalewicz Z. Particle swarm optimization for single objective continuous space problems: a review // Evolutionary Computation. – 2017. – Vol. 25 (1). – P. 1-54. – DOI: 10.1162/EVCO_r_00180.
3. Родзин С.И. Современное состояние биоэвристик: классификация, бенчмаркинг, области применения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 280-298. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-280-298.
4. Bode N., Wood A., Franks D. The impact of social networks on animal collective motion // Animal Behavior. – 2011. – Vol. 82 (1). – P. 29-38. – DOI: 10.1016/j.anbehav.2011.04.011.
5. Broom M., Koenig A., Borries C. Variation in dominance hierarchies among group-living animals: modeling stability and the likelihood of coalitions // Behavior Ecology. – 2009. – Vol. 20. – P. 844-855. – DOI: 10.1093/beheco/arp069.
6. Родзин С.И., Родзина О.Н. Машинное обучение: метаэвристики дифференциально-векторного движения. – Чебоксары: ИД «Среда», 2024. – 140 с. – ISBN 978-5-907830-17-2.
7. Long W., et. al. Solving high-dimensional global optimization problems using an improved sine cosine algorithm // Expert systems with applications. – 2019. – Vol. 123. – P. 108-126. – DOI: 10.1016/j.eswa.2018.11.032.
8. Hamzaçebi C. Improving genetic algorithms' performance by local search for optimization // Appl. Math. Comput. – 2008. – Vol. 196 (1). – P. 309-317. – DOI: 10.1016/j.amc.2007.05.068.
9. Rashedi E., Nezamabadi-pour H., Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm // Information Science. – 2009. – Vol. 179. – P. 2232-2248. – DOI: 10.1016/j.ins.2009.03.004.
10. Storn R., Price K. Differential evolution—a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces // Technical report TR-95-012. ICSI. Berkeley. CA, 1995. – DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>.
11. Wilcoxon F. Individual comparisons by ranking methods Frank Wilcoxon // Bio-metrics Bulletin. – 2006. – Vol. 1(6). – P. 80-83. – DOI: 10.1007/978-1-4612-4380-9_16.
12. Al-Baali M. On the behavior of combined extra-updating/self-scaling BFGS method // Jour. Comput. Appl. Math. – 2001. – Vol. 134. – P. 269-281. – DOI: 10.1016/S0377-0427(00)00554-9.
13. Mart'i, et al. Intelligent multi-start methods // Handbook of Metaheuristics. – Cham: Springer, 2019. – P. 221-243. – DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-91086-4_7.

Междисциплинарная коммуникация и ее роль в применении искусственного интеллекта в медицинской отрасли

Шпаковская Ирина Игоревна

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
iishpakovskaya@stud.etu.ru

Мельдо Анна Александровна

¹Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);
²Санкт-Петербургский государственный
университет
Санкт-Петербург, Россия
Anna.meldo@yandex.ru

Сидорина Дарья Алексеевна

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
fedotovadora@yandex.ru

Кузнецов Егор Михайлович

Северный государственный
медицинский университет
Архангельск, Россия
egoras99@gmail.com

Дора Светлана Владимировна

Первый Санкт-Петербургский государствен-
ный медицинский университет
им. акад. И.П. Павлова
Санкт-Петербург, Россия
doras2001@mail.ru

Аннотация. Внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в медицину предполагает новые возможности для улучшения диагностики и лечения. Распоряжение Правительства РФ от 17 апреля 2024 года, предписывающее наличие 12 медицинских изделий с ИИ в каждом регионе к 2030 году [1]. Анализ российского рынка ИИ в сфере здравоохранения показывает, что существует ряд препятствий, ограничивающих активное внедрение ИИ в клиническую практику. Так, например терминологические особенности восприятия и различия в методологических стереотипах могут привести к ошибкам в техническом задании и некорректным результатам. В статье проведен обзор ограничивающих факторов и исследуется роль качественного взаимодействия между разработчиками и врачами. Мы акцентируем внимание на важности эффективной междисциплинарной коммуникации, как фундаменте успеха применения ИИ в медицинской отрасли и предлагаем пути ее улучшения.

Annotation. The introduction of artificial intelligence (AI) technologies in medicine implies new opportunities for improving diagnostics and treatment. The Russian Government Order of 17 April 2024 prescribing the availability of 12 medical devices with AI in each region by 2030 [1]. The analysis of the Russian AI market in healthcare shows that there are a number of obstacles limiting the active implementation of AI in clinical practice. For example, terminological peculiarities of perception and differences in methodological stereotypes can lead to errors in technical specifications and incorrect results. This article reviews the limiting factors and explores the role of quality interaction between developers and clinicians. We emphasise the importance of effective interdisciplinary communication as a foundation for the success of AI applications in the medical industry and suggest ways to improve it.

Ключевые слова: искусственный интеллект в медицине, междисциплинарная коммуникация, новые технологии в медицине, цифровизация здравоохранения

Keywords: artificial intelligence in medicine, interdisciplinary communication, new technologies in medicine, digitalisation of healthcare

I. ВВЕДЕНИЕ

Медицина – одно из наиболее перспективных и научекомких направлений для применения искусственного интеллекта (ИИ) и других информационных технологий. Это обусловлено рядом факторов.

- Старение населения вызывает повышение спроса на системы мониторинга состояния пациентов, лечебно-профилактические оздоровительные помощники.
- Скорость удвоения количества медицинской информации значительно возрастает. Так в 2000 году она удваивалась за два года [2], в 2020 году – за 73 дня [3].

Медицинская информация – это не только материалы, содержащиеся в печатных изданиях и интернет-ресурсах, это и сведения о результатах исследований, записи в электронных медицинских картах (ЭМК), данные, получаемые с носимых устройств и т.д. Появление новых заболеваний становится вызовом для диагностических и лечебных служб. Так, в связи с эпидемией COVID-19, количество компьютерных томографий грудной клетки выросло по различным данным в 1,5–2 раза за 2019–2020 годы [4, 5]. При этом количество специалистов, способных качественно обрабатывать этот массив становится недостаточным.

Новыми целями диагностических и лечебных мероприятий становится персонализированный подход и индивидуальный прогноз течения заболевания с учетом особенностей конкретного больного.

Таким образом, врачебное сообщество признает, что для обработки огромного потока информации и решения нового уровня задач необходимы способы, отличные от традиционных научных подходов медицинской отрасли. В целом, информационный поток о возможностях ИТ-сфера говорит о том, что ИИ, машинное обучение, математическое моделирование являются способами преодоления вышеописанных трудностей. Вместе с тем существует ряд ограничивающих факторов, препятствующих активному внедрению данных технологий в практическую деятельность.

II. 7 ПРОБЛЕМ АКТИВНОГО ВНЕДРЕНИЯ ИИ В МЕДИЦИНЕ. ВЗГЛЯД ВРАЧЕЙ И РАЗРАБОТЧИКОВ

1) Ограничение представление о возможностях ИТ

Несмотря на то, что ИТ-разработки для области медицины развиваются с середины прошлого века, до первой декады 2000-х годов вовлеченность работников системы здравоохранения в эту тематику была минимальной, она сводилась лишь к вопросу «заменит ИИ врача или нет». В то же время и инновационные продукты, создаваемые без участия врачей, не могли быть жизнеспособными, поскольку не учитывали специфику, необходимую для эффективного использования в практическом здравоохранении. Актуальность использования медицинских знаний при создании систем автоматизированной диагностики, прогнозной аналитики, персонализированного лечения послужила стимулом к объединению специалистов области ИТ и врачей разных специальностей в отдельных научных проектах. Анализ публикационной активности из медицинского ресурса PubMed [6] показал, что по запросу «Artificial intelligence in medicine» взлет публикационной активности начинается лишь с 2017 года, до этого времени ресурс показывает единичные статьи. Аналогичные результаты были получены и по поисковому запросу «Machine learning». Изучение содержания ранних статей на тему ИИ и МО позволило прийти к выводу, что в изданиях медицинской направленности описания решений на основе ИИ в основном посвящены сравнению автоматизированных интеллектуальных систем между собой, а также с врачами, однако в них не отражены основы и этапы создания этих систем. Большую часть информации можно было найти в технических журналах, однако в этих публикациях не освещались сведения из предметной области [7]. Это свидетельствует о некой закономерности в отставании практической реализации инновационных решений от возможностей сферы ИТ. В то же время завышенные ожидания медицинских специалистов о возможностях и ограничениях современных ИИ-технологий могут приводить к разочарованиям относительно функциональности и точности ИИ-систем. Например, врачи могут ожидать, что ИИ сможет диагностировать редкие заболевания с высокой точностью на основе ограниченного объема данных, что может быть технически невыполнимо в текущих условиях. Недостаток понимания технологических аспектов может также приводить к недостаточному учету необходимых ресурсов и времени для разработки и тестирования систем.

2) Доказательная медицина как причина скептицизма и недоверия к ИИ-технологиям со стороны врачей

Врачи зачастую сомневаются в точности и надежности ИИ-систем для диагностики или лечения пациентов, предполагая риски ошибок и негативных последствий. Это может быть вызвано недостаточным пониманием принципов работы ИИ. Консерватизм и критическое мышление представителей области здравоохранения во многом связаны с применением на всех этапах лечебно-диагностического процесса принципов доказательной медицины – то есть таких подходов к профилактике, диагностике, лечению, когда решения принимаются на основе имеющихся научных доказательств эффективности и безопасности тех или иных подходов [8]. Подтверждение достоверности научных подходов в медицине в соответствии с принципами доказательной медицины имеет пять уровней в зависимости от используемых методов. Уровни доказательности (обозначаются римскими цифрами) являются основой четырех классов рекомендаций принятия клинических решений (обозначаются латинскими заглавными буквами). Так самый низкий уровень доказательности V – доказательства основаны на примерах и клинических случаях, самый высокий I – доказательства получены в результате мета-анализа большого числа хорошо спланированных randomized controlled trials (рандомизированных исследований), randomized controlled trials (рандомизированных исследований с низким уровнем ложноположительных и ложноотрицательных тестов). Класс рекомендаций A (высший) устанавливается если имеются доказательства I уровня или многочисленные данные о II, III, IV уровнях доказательности, класс рекомендаций D (низший) – устанавливается, если доказательства эмпирические, слабые или несистематические [9].

Такая унификация традиционной системы научных доказательств в медицине основана на методах статистики. Важно отметить, что основным принципом является прозрачность, то есть любое клиническое решение (выбор варианта лечения из возможных альтернатив) должно быть обосновано доказательствами, которые могут быть проверены другими людьми. Отсюда рождается парадигма мышления врача – ему нужно понимать «как это работает», почему можно доверять тому или иному мнению, решению, алгоритму, как получены те или иные результаты. Таким образом, доверие и принятие врачами тех методов машинного обучения, математического моделирования которые могут дать ответы на эти вопросы, представляется более полным. Вместе с тем для преодоления скептицизма врачей необходимо проводить обучающие мероприятия и демонстрировать успешные примеры использования ИИ в медицине.

3) Проблемы, связанные с профессиональной терминологией

A. Специализированная врачебная терминология

В медицине широко используется специализированная терминология, которая может быть непонятна для разработчиков без дополнительных пояснений. Медицинские специалисты часто употребляют аббревиатуры, давно ставшие привычными в их практике. Например, в проекте в области репродуктивной эндокринологии мы столкнулись с такими терминами, как ДТЗ (диффузный токсический зоб), антитела к ТПО (антитела к тиреопроксидазе), ДАД (двусторонняя аднексэктомия) и АМГ

(антимюллеров гормон), при решении задачи прогнозирования заболеваний связанных с щитовидной железой было важно определить, какие показатели будут признаками на входе, а какие признаками на выходе. В данном случае задачей было выявление предикторов различных клинических событий для группы женщин с преждевременной менопаузой. Команда разработчиков построила дерево решений на основе значимых параметров для классификации по пяти различным группам данных. Хотя дерево решений демонстрировало высокую точность предсказаний в 85% на кросс-валидации, результат оказался неудовлетворительным, поскольку на выходе эксперимента причинно-следственная связь клинических событий и состояния пациенток (преждевременная менопауза) была обратной, ключевая задача не была решена.

Таким образом, понимание терминов и аббревиатур, базовые знания предметной области критически важны для разработчиков, поскольку они позволяют точно интерпретировать клинические задачи и требования, а также обеспечивает создание технических решений, которые точно соответствуют медицинским потребностям. Несоответствие между поставленной клинической задачей и технической реализацией проекта подчеркивает необходимость улучшения коммуникации между медицинскими специалистами и разработчиками. Эффективное взаимодействие, четкость формулировки и понимания задач могут значительно повысить результативность медицинских исследований, проводимых на основе ТИИ.

B. Профессиональная омонимия

В доступной литературе совпадение разных слов или словосочетаний по своему внешнему звуковому облику (омонимия) [10] не описано с точки зрения проблематики влияния этого явления на развитие каких-либо технологий. Вместе с тем нам представляется, что толкование разными специалистами смысловой стороны общих терминов может оказывать влияние на слаженность работы междисциплинарной команды. Примером может служить различное восприятие понятия «база данных», где данные для разработчика – это набор цифр, материал для обработки, для врача же – это уникальный набор знаний о конкретных пациентах, который, зачастую, формируется годами. Различие смыслового восприятия может приводить к неоднозначной трактовке ценности вклада участников в научный проект. Из этого следует, что для эффективного достижения цели проекта с медицинским направлением следует учитывать особенности риторики в междисциплинарной среде. Вместе с тем вопрос улучшения качества формирования наборов обучающих данных также является актуальным, необходимо повышать осведомленность врачебного сообщества о важности качественных наборов данных для МО [11, 12].

4) Проблемы, связанные с техническим заданием

Отсутствие приоритизации, неясность требований могут приводить к снижению качества и эффективности конечного программного решения, что усугубляет угрозы безопасности, низкой удовлетворенности пользователей, снижению доверия к новым технологиям отказу от использования инновационного продукта на основе ТИИ. Учитывая тот факт, что медицинские работники владеют полным спектром данных и способны опреде-

лить задачи исследований, связанных с ИИ, именно они ответственны за формулировку технических заданий (ТЗ). Вместе с тем, врачи не знакомы с методологией составления ТЗ, подобные задачи не входят в систему базового и постдипломного медицинского образования. Основной функционал медицинских работников далек от проработки требований к системам ИИ, поскольку традиционно врачи больше выступали в роли пользователей технических решений. В настоящее время роль врача смещается в сторону соразработчика и партнера при создании систем ИИ для здравоохранения [13]. Тем не менее технические задания, составляемые врачами, требуют постоянной доработки, в ходе которой возможны и частые изменения требований. Эти изменения приводят к переработкам и задержкам сроков выполнения задания. Каждый новый запрос требует значительных изменений в алгоритмах, что увеличивает время и стоимость разработки. Поэтому с целью своевременной коррекции алгоритмов и улучшения их качества необходима своевременная и конструктивная обратная связь между членами команды на всех этапах разработки ИИ-решений (от концепции до тестирования и внедрения). Примером недостаточной проработки требований может служить проект по внедрению ИИ для мониторинга состояния пациентов в реанимации. В ТЗ не была отражена, а разработчики не учли необходимость интеграции с существующими системами медицинского оборудования. В результате проект столкнулся с большими задержками и потребовал переработки значительной части кода. Другой пример непроработанного технического задания связан с недостаточным взаимодействием с конечным пользователем. В проекте по созданию ИИ для управления медицинскими записями разработчики ориентировались только на мнение врачей, игнорируя потребности и мнения медсестер и администрации. В результате система оказалась неудобной для большинства пользователей и потребовала значительных доработок после запуска.

Таким образом, в проработке требований уже на начальном этапе необходим тесный профессиональный контакт между исследователями разных специальностей для минимизации временных затрат при создании систем ИИ.

5) Клиническая валидация результатов моделирования в медицине, регистрация программного обеспечения, являющегося медицинским изделием

Согласно Письму Росздравнадзора от 13.02.2020 №О2И 297/20 «О программном обеспечении»[14], если результат действия программного обеспечения (ПО) заключается в интерпретации в автоматическом режиме, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта, или по заданным медицинским работником параметрам, влияющим на принятие клинических решений, набора данных, полученных от медицинских изделий, допущенных к обращению в установленном порядке или введенных медицинскими работниками в целях оказания медицинской помощи, ПО является программой для ЭВМ или ее модулем, то оно относится к категории медицинских изделий (МИ). Законодательство РФ предусматривает ряд нормативных актов, регулирующих обращение МИ [15]. Согласно Федеральному закону от 21.11.2011 №323ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации», обращение

медицинских изделий включает в себя технические испытания, клинические испытания, экспертизу качества, эффективности и безопасности медицинских изделий, их государственную регистрацию, производство, изготовление, ввоз и вывоз с территории Российской Федерации, подтверждение соответствия, хранение, транспортировку, реализацию, монтаж, наладку, применение, эксплуатацию, в том числе техническое обслуживание, предусмотренное нормативной, технической и (или) эксплуатационной документацией производителя (изготовителя), а также ремонт, утилизацию или уничтожение. На территории Российской Федерации разрешается обращение медицинских изделий, прошедших государственную регистрацию в порядке, установленном Правительством Российской Федерации. Росздравнадзор осуществляет ведение государственного реестра медицинских изделий и организаций (индивидуальных предпринимателей), осуществляющих производство и изготовление медицинских изделий, и размещает его на своем официальном сайте в сети "Интернет". Клинические испытания и государственная регистрация МИ – это необходимые этапы жизненного цикла ПО и обращения МИ, без которых невозможно применение программного продукта в практике медицинского учреждения. Однако, специалисты «по продвижению» включаются в медицинские проекты по моделированию в исключительно редких случаях. Таким образом, часто разработки с большим потенциалом завершаются на этапе технической валидации, и их путь до практического применения оказывается закрытым. Оборотная сторона проблемы заключается в том, что коммерческие структуры-разработчики ПО имеют возможности и средства для продвижения ПО как коммерческого продукта, однако они часто используют врачей лишь как «поставщиков данных», не учитывая их компетенции как потенциал соразработчиков. Продукт, созданный без участия врачей, также может содержать дефекты, препятствующие успешным клиническим испытаниям. Исходя из вышеизложенного, следует, что, планируя ИТ разработку в области медицины, вероятно, следует определять место и роль участников команды, которые будут отвечать за все этапы жизненного цикла программного продукта, являющегося медицинским изделием.

6) Вопросы защиты персональных данных

Право пациентов на защиту персональных данных и сохранение врачебной тайны закреплено законодательством [16]. Создание систем ИИ, математических моделей предусматривает использование обезличенных данных, по которым определить их принадлежность конкретному субъекту невозможно. Тем не менее, правовые аспекты использования каких-либо сведений о пациентах часто вызывают вопросы. Сведения о состоянии здоровья гражданина относятся к специальным категориям персональных данных. Краеугольным камнем здесь выступают положения Федерального закона №152-ФЗ «О персональных данных», свидетельствующие о том, что обработка данных пациента может быть осуществлена если субъект персональных данных дал согласие в письменной форме на их обработку. Правовые отношения устанавливаются между пациентом (субъект персональных данных) и медицинской организацией (оператор) с момент обращения пациента за медицинской помощью, посредством заключения договора

и подписания информированного добровольного соглашения (ИДС) на обработку персональных данных. В понятие обработка персональных данных включены, в том числе, действия по обезличиванию и передаче данных (распространение, передача, доступ). Обработке подлежат только персональные данные, которые отвечают целям их обработки. Содержание и объем обрабатываемых персональных данных должны соответствовать заявленным целям обработки. Как правило, в ИДС медицинских организаций нет сведений, что среди целей обработки данных имеются научные исследования по созданию систем ИИ или математических моделей.

Несмотря на то, что законодательством предусмотрено, что оператор вправе поручить обработку персональных данных другому лицу с согласия субъекта персональных данных, на основании заключаемого с этим лицом договора, оформление соглашений с техническими ВУЗами и ИТ-компаниями не являются привычной практикой для медицинских организаций. Возникающая неопределенность правовых отношений и риски возникновения юридических прецедентов вынуждают руководства медицинских организаций воздерживаться от активных действий, направленных на разработку и внедрение новых технологий.

Решением данной проблемы могут стать мероприятия по уточнению сведений в ИДС для пациента, расширению перечня целей обработки данных о состоянии здоровья пациента. Кроме того, необходимо учитывать и другие положения упомянутого Федерального закона, которые говорят о том, что обработка персональных данных допускается если она необходима для осуществления научной деятельности при условии, что при этом не нарушаются права и законные интересы субъекта персональных данных; если обработка персональных данных осуществляется в статистических или иных исследовательских целях, при условии обязательного обезличивания персональных данных; если обработка персональных данных необходима для защиты жизни, здоровья или иных жизненно важных интересов субъекта персональных данных либо жизни, здоровья или иных жизненно важных интересов других лиц и получение согласия субъекта персональных данных невозможно; если обработка персональных данных осуществляется в медико-профилактических целях, в целях установления медицинского диагноза, оказания медицинских и медико-социальных услуг при условии, что обработка персональных данных осуществляется лицом, профессионально занимающимся медицинской деятельностью и обязанным сохранять врачебную тайну.

Исходя из вышесказанного, для соблюдения законодательства по защите персональных данных пациентов вовлеченность врачей в междисциплинарную команду по разработке алгоритмов ИИ становится, безусловно, актуальной.

7) Итерационный процесс разработки систем с ИИ

Системы искусственного интеллекта создаются, тестируются и улучшаются через повторяющиеся шаги [17]. Эти шаги включают:

- Сбор данных: На этом этапе данные собираются из различных источников для последующего анализа и использования в модели.

- Подготовка данных: Подготовленные данные очищаются от ошибок, нормализуются и трансформируются для обеспечения их готовности к обучению модели.
- Выбор модели: Определяется алгоритм или несколько алгоритмов, которые наилучшим образом подходят для решения поставленной задачи.
- Обучение модели: Модель обучается на подготовленных данных, что включает настройку параметров и адаптацию модели для достижения наилучших результатов.
- Настройка параметров: Параметры модели тонко настраиваются для максимизации производительности и точности предсказаний.
- Оценка и тестирование: После обучения модель тщательно тестируется для проверки её эффективности и надёжности.
- Развёртывание и прогнозирование: Завершенная модель разворачивается для использования в реальных условиях, где она может делать прогнозы или помогать в принятии решений.

Каждый из этих шагов требует внимания к деталям и может включать итерации для дополнительных улучшений. Итерационная разработка позволяет постепенно совершенствовать ИИ-системы, однако это также создаёт сложности для медицинских работников, которым необходимо адаптироваться к постоянно изменяющимся технологиям и методам работы.

В медицинской практике стабильность и предсказуемость критически важны, поскольку любые изменения в диагностических или лечебных инструментах требуют времени на освоение и могут влиять на лечение пациентов. Постоянные обновления ИИ требуют от медицинских работников дополнительных усилий на переобучение и адаптацию, что может быть времязатратным и вызывать сопротивление. Кроме того, внедрение не до конца отлаженных версий ИИ может повысить риск ошибок, что недопустимо в клинической среде, где от высокой точности и надежности зависят жизни пациентов.

III. МЕРЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВЕННОГО МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Для обеспечения качественного междисциплинарного взаимодействия в разработке и применении искусственного интеллекта в медицинской отрасли важно принимать во внимание следующие рекомендации:

- Обучение и развитие коммуникативных навыков: Разработка специализированных тренингов по междисциплинарной коммуникации для всех участников проекта – от медицинских специалистов до инженеров и аналитиков данных. Эти программы должны включать обучение языку и специфике друг друга, чтобы улучшить взаимопонимание и уменьшить вероятность недопонимания.
- Регулярные совместные сессии: Организация регулярных встреч, на которых команды могут обсуждать прогресс, проблемы и изменения в проекте. Это помогает поддерживать прозрачность процессов и учитывать мнения всех сторон.

- Использование цифровых инструментов для улучшения коммуникации: Внедрение общедоступных платформ для совместной работы, таких как Slack, MicrosoftTeams или Trello, которые могут помочь в организации задач, обмене файлами и управлении проектами, делая совместную работу более организованной и эффективной.

- Разработка стандартов обмена данными и терминологией: Создание единого словаря терминов и определений, которые используются в проекте, чтобы избежать путаницы и ошибок. Также важно установить четкие протоколы для обмена и защиты данных.

- Включение пациентов и конечных пользователей в процесс разработки: обеспечение обратной связи от конечных пользователей системы, таких как медицинский персонал и пациенты, может значительно улучшить качество и практичность разрабатываемых решений.

- Международное сотрудничество и обмен опытом: Участие в международных конференциях, семинарах и вебинарах по теме искусственного интеллекта в медицине для обмена знаниями и опытом с коллегами из других стран.

Применение этих мер поможет не только улучшить качество разработки ИИ-решений в медицине, но и обеспечить их соответствие клиническим потребностям и повысить их приемлемость среди медицинских специалистов [18].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При отсутствии эффективной междисциплинарной коммуникации и обмена знаниями прогресс ИТ решений в медицине трудно достижим. Улучшение сотрудничества между разработчиками и медицинскими работниками может стать залогом успешного внедрения искусственного интеллекта в медицинскую практику. Когда разработчики и медицинское сообщество объединяют усилия, создавая инновационные ИИ-решения, результатом становится мощный синергетический эффект, способный трансформировать медицину. Однако, этот процесс требует не только технической экспертизы, но и глубокого взаимопонимания, которое можно достичь через качественное взаимодействие. Его можно сравнить с танцем, где каждый шаг требует координации и синхронности. Разработчики, создавая алгоритмы, должны чувствовать ритм клинической практики, а врачи, в свою очередь, должны быть в курсе технологических возможностей. Только так можно разработать алгоритмы, которые не просто теоретически идеальны, но и практически применимы и полезны в реальных условиях. Включение медицинских консультантов непосредственно в команды разработчиков поможет обеспечить лучшее понимание клинических нужд и условий. Эти консультанты могут участвовать в планировании, разработке и тестировании ИИ-решений, предоставляя ценные инсайты и обратную связь.

Проведение обучающих сессий, где разработчики могут научить медиков основам ИИ и машинного обучения, а медики могут объяснить клинические процессы и задачи, с которыми они сталкиваются. Это поможет создать общую базу знаний и улучшить понимание друг друга.

Организация воркшопов и тренингов, на которых команды могут совместно работать над реальными проектами и кейсами. Это не только улучшит навыки, но и укрепит командный дух и взаимопонимание.

Обратная связь от врачей на всех этапах разработки ИИ-систем позволяет выявлять тонкости и нюансы, которые могут быть упущены в лабораторных условиях.

Объяснимость решений, принимаемых ИИ, является еще одной важной составляющей. Врачи должны понимать, на основе каких данных и каким образом алгоритм пришел к своим выводам, чтобы интегрировать эти рекомендации в свою практику. Прозрачность алгоритмов и их объяснимость создают основу для доверия к технологиям, без которого невозможно их широкое внедрение. Регулярное представление интерактивных демонстраций и прототипов ИИ-решений медицинским специалистам позволит получить оперативную обратную связь. Это поможет своевременно вносить необходимые корректизы и улучшения, а также продемонстрировать реальную пользу и возможности технологий.

Регулярные встречи между разработчиками и врачами позволяют оперативно решать возникающие проблемы и обсуждать текущий прогресс проектов. Это помогает создавать более слаженные и эффективные команды.

Введение специализированных ролей - назначение ответственных за взаимодействие лиц в междисциплинарных командах поможет поддерживать постоянный и продуктивный диалог. Если рассматривать весь лечебно-диагностический процесс с использованием ИИ как единый цикл, то разработчик в сфере медицинских информационных технологий становится косвенным участником этого процесса, поддерживая систему в рабочем состоянии, участвуя в дообучении систем ИИ, а врач-соразработчик разделяет ответственность за качество созданных алгоритмов, поскольку ответственен за клиническую валидацию и наборы данных для обучения и тестирования ИИ. Стандартизация коммуникационных процессов путем разработки и внедрения стандартов и процедур для взаимодействия, таких как формы отчетов, регулярные встречи и согласование требований, поможет улучшить качество и четкость коммуникации.

Пациенты также должны быть частью этого диалога. Прозрачность в использовании ИИ, объяснение преимуществ и возможных рисков, защита прав, учет их пользовательского мнения – все это помогает создать атмосферу доверия, пациенты становятся активными участниками процесса, что положительно сказывается на результатах.

Таким образом, эффективная коммуникация выступает в роли “невидимого клея”, скрепляющего все аспекты применения ИИ в медицине. Это не просто обмен информацией, а глубокое взаимодействие, основанное на доверии, взаимопонимании и общей цели – улучше-

ние качества медицинской помощи. Только в условиях открытого и честного диалога можно максимально реализовать потенциал ИИ, сделав его незаменимым помощником врача и союзником пациента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжением Председателя Правительства РФ М. Мишустина №959-р от 17.04.2024г. – <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408813257>.
2. Артиюхов С.В. Медицина в Internet // Мир ПК. – 2000. – № 4. – С. 116-118.
3. https://files.dataeconomy.ru/Docs/Dostup_k_medicinskim_dannym_ob_rabotka_dannyh_v_medicinskoj_otrasli.pdf.
4. Дружинина Ю.В., Рыжков С.А., Водоватов А.В. и др. Влияние COVID-19 на динамику изменений дозовой нагрузки на пациентов при проведении компьютерной томографии в медицинских организациях Москвы // DigitalDiagnostics. – 2022. – Т. 3, № 1. – С. 5-15.
5. Полопова А.Ю., Водоватов А.В., Романович И.К., Рыжков С.А., Дружинина П.С., Руслан Р. Ахматдинов. Влияние пандемии COVID-19 на структуру лучевой диагностики и коллективные дозы населения Российской Федерации при медицинском обучении в 2020 г. // Радиационная гигиена. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 6-39. – DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-6-39.
6. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=artificial+intelligence+in+medicine&filter=simsearch2.ffif&filter=simsearch3.ffif&filter=years.2000-2024>.
7. Мелдо А.А. Разработка и внедрение системы искусственного интеллекта в лучевой диагностике очаговых образований в легких: дисс. ... д-ра мед. наук. – 2022. – 428 с. – EDN PWQQZX.
8. HaniaSzajewska. Evidence-Based Medicine and Clinical Research: Both Are Needed, Neither Is Perfect // Annals of Nutrition & Metabolism. – 2018. – Vol. 72, Iss. 3. – P. 13-23. – ISSN 1421-9697. – DOI: 10.1159/000487375.
9. Андреева Н.С., Реброва О.Ю., Зорин Н.А., Авксентьева М.В., Омельяновский В.В. Системы оценки достоверности научных доказательств и убедительности рекомендаций: сравнительная характеристика и перспективы унификации // Медицинские технологии. Оценка и выбор. – 2012. – Т. 10. – Вып. 4. – С. 678.
10. <https://cyberleninka.ru/article/n/omoniemy-v-yazyke-spetsialnosti-lingvisticheskij-i-metodicheskij-aspekiy/viewer>.
11. Homeyer A. et al. Recommendations on compiling test datasets for evaluating artificial intelligence solutions in pathology // Modern Pathology. – 2022. – Vol. 35, No. 12. – P. 1759-1769.
12. Косарева А.А. Алгоритм подготовки набора данных для обучения нейронных сетей на примере задачи анализа радиологических изображений лёгких // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 66-73.
13. Мелдо А.А. Разработка и внедрение системы искусственного интеллекта в лучевой диагностике очаговых образований в легких: дисс. ... д-ра мед. наук. – 2022. – 428 с.
14. <https://roszdravnadzor.gov.ru/medproducts/registration/documents/65752>.
15. ГОСТ Р 56429 Изделия медицинские. Клиническая оценка; Федеральный закон от 21.11.2011 №323ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации».
16. Федеральный закон от 21.11.2011 №323ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации»; Федеральный закон от 27.07.2006 N 152-ФЗ "О персональных данных".
17. Гудфеллоу Я., Иошуа Б., Курвиль А. Глубокое обучение. – Litres, 2022. – 25 с.
18. Suen S., Scheinker D., Enns E. Artificial Intelligence for Healthcare: Interdisciplinary Partnerships for Analytics-driven Improvements in a Post-COVID World. – Cambridge University Press, 2022. – P. 151-152.

Автоматизация синтеза моделей знаний на основе концептуальных графов с применением технологий машинного обучения

Власенко Сергей Владимирович

Кафедра автоматики и процессов управления

Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия

svvlasenko@etu.ru

Аннотация. Настоящий доклад посвящен вопросам разработки методов и средств автоматизации построения моделей знаний класса концептуальных графов на основе текстовой информации. Основным предметом исследования является методика использования технологий машинного обучения. Особое внимание при этом уделяется проекту открытой платформы, которая позволила бы эволюционно развивать соответствующие программные средства на базе процедур коллективного обучения.

Abstract. The present report is dedicated to the issues of methods and software development for automating building of knowledge models of conceptual graphs class on the base of text information. The main subject of this research is the methodology of machine learning technologies usage. The special attention, in doing so, is paid for the open platform project, which would allow developing appropriate program tools evolutionarily based on collective learning procedures.

Ключевые слова: представление знаний, концептуальные графы, машинное обучение, нейронные сети, Semantic Web, Common Logic.

Keywords: knowledge representation, conceptual graphs, machine learning, neural networks, Semantic Web, Common Logic.

I. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение концепций цифровой экономики, развитие технологий IoT, PoT, M2M, Web 3.0 и др. существенно меняет облик современных подходов к построению интеллектуальных систем распределенной обработки данных и знаний. Наиболее развитый и распространенный стек технологий, применяемых в настоящее время для решения соответствующих задач, объединяется программой Semantic Web корпорации W3C. Данный стек опирается на такие средства, как RDF/RDFS, OWL, SPARQL, SWRL, RIF. При этом базисом представления знаний являются онтологические модели принятого класса. Между тем в значительном множестве интеллектуальных приложений требуются (или более эффективны) иные виды моделей знаний, формально не приводимые к форме онтологий. Сказанное относится к таким сферам применения интеллектуальных систем распределенной обработки данных и знаний как семантический поиск и категоризация веб-контента, NLP (Natural Lan-

guage Processing – обработка естественной речи), интеллектуальный Data Mining, интеллектуальное управление распределенными объектами и к многим другим проблемным областям. Кроме того, имеются и существенные принципиальные ограничения нотаций OWL, используемых при описании онтологий в рамках Semantic Web. Среди них можно особо выделить следующие:

- отсутствие возможности представления процедурных знаний;
- ограничение на семантику отображаемых отношений (в явном виде отношения не специфицируются и при интерпретации определяются только семантикой языка описания);
- невозможность адекватного отображения контекстно-зависимых знаний в рамках одной онтологии;
- ограничение на поддержку дискрипционных логик (поддержка ограничена диалектами Light и DL и не распространяется на наиболее семантически мощные диалекты Full).

Перечисленных ограничений лишен подход, основанный на концепциях Common Logic (CL). В настоящее время подход поддерживается и на уровне стандартов ISO/IEC (последняя редакция стандарта ISO/IEC 24707 датирована 2018 г.). В рамках CL открывается возможность использования альтернативного базового средства представления моделей знаний – концептуальных графов (КГ), значительно превосходящих онтологии по степени универсальности и выразительной мощности (показательно, что язык OWL является семантическим подмножеством нотаций КГ). Одной из основных сложностей на пути широкого внедрения аппарата КГ в практику создания современных интеллектуальных информационных систем и технологий является слабая поддержка со стороны ведущих производителей программного обеспечения, работающих в сфере глобальных информационных сетей, распределенных систем обработки данных и знаний и т.п. На текущий момент относительно мало используются и программные инструменты, позволяющие работать с КГ (Hets, Amine, CoGui, CharGer и др.). Соответственно, доступный парк КГ-моделей является весьма ограниченным. Причины возникновения

подобной ситуации могут обсуждаться, но очевиден тот факт, что массового применения аппарата КГ в рассматриваемой предметной области на сегодняшний день не наблюдается, хотя потенциальные возможности данного аппарата хорошо известны ([1,2]) и указывают на целый ряд преимуществ от применения КГ в соответствующих приложениях. Представляется, что важным шагом на пути распространения и развития основанных на КГ технологий могло бы стать создание программной платформы, ориентированной на автоматизированное построение КГ-моделей с использованием входной текстовой информации, а также на поддержку обучения нейросетевых моделей, способных обеспечить подобное преобразование. Именно этой комплексной задаче и посвящен настоящий доклад.

II. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ГРАФЫ В CL

CL описана в стандарте ISO/IEC 24707 ([3]) и исходно ориентирована на поддержку концепций Semantic Web. Общие требования к качественным свойствам CL в явной форме указаны в тексте стандарта и сводятся к следующим основным положениям:

- полное и однозначное отображение логики первого порядка;
- обеспечение универсального XML-синтаксиса для обмена логическими выражениями в Интернете (в том числе, обеспечение способности отображения любого контента, выражаемого в RDF/RDFS или OWL);
- простота применения в рамках веб-технологий (включая соответствие опубликованным спецификациям XML, возможность прямого использования IRI, ориентация на Unicode и т.п.);
- обеспечение использования CL в открытых сетях (отсутствие необходимости в трансляции и в согласовании синтаксиса между CL-агентами, однозначность интерпретаций, возможность сопоставления локальных контекстов и т.д.)
- исключение необходимости необоснованных предположений о семантике логических связей.

CL определена в стандарте как базис для построения логических языков, основанных на логике первого порядка. Данный базис описан моделями абстрактного синтаксиса и семантики, которым соответствуют все языки семейства CL. Помимо абстрактных моделей в стандарте специфицированы три нормативных диалекта CL:

- CLIF (Common Logic Interchange Format);
- CGIF (Conceptual Graph Interchange Format);
- XCL (eXtended Common Logic Markup Language).

Все три перечисленных языка являются полноценными реализациями CL, однако в части представления знаний наиболее мощным выразительным средством можно считать CGIF, что обусловлено следующими причинами:

- совмещение формальной логической и структурной парадигм представления знаний;

- поддержка отображения как декларативных, так и процедурных знаний;
- обеспечение гибкой статической типизации данных и знаний;
- прямое отображение контекстных зависимостей знаний и связей между ними.

Соответственно, в контексте решения задач из области NLP ориентация на преимущественное использование CGIF в рамках CL представляется вполне обоснованной. Кроме того, важным обстоятельством здесь является и то, что, концептуальные графы, являющиеся структурной основой нотации CGIF, могут рассматриваться как частный случай семантических сетей, т.е. класса моделей знаний, наиболее близкого к конструкциям естественных языков (ЕЯ).

III. НОТАЦИИ CGIF

В рассматриваемом стандарте ISO/IEC описание CGIF дано в виде спецификаций трех диалектов CL (как это сформулировано в тексте самого стандарта):

- абстрактный синтаксис КГ;
- ядро CGIF (базовый CGIF);
- расширенный CGIF.

Все три приведенных диалекта являются полностью совместимыми диалектами CL в том смысле, что каждое предложение CL может быть переведено в семантически эквивалентное предложение на каждом из них, и каждое предложение на любом из этих трех диалектов может быть переведено в семантически эквивалентное предложение на CL. Семантическая эквивалентность устанавливается по определению: семантика каждого предложения в расширенном CGIF определяется переводом в предложение в базовом CGIF, семантика каждого предложения в базовом CGIF определяется переводом в предложение в абстрактном синтаксисе описания КГ, и семантика каждого предложения в абстрактном синтаксисе КГ определяется путем его перевода в абстрактный синтаксис CL.

Следует отметить, что в качестве расширения CGIF может рассматриваться и более ранняя версия данного языка, описанная в стандарте ISO/IEC 14481 «Information Technology (IT) – Conceptual Schema Modeling Facilities (CSMF)». Указанная версия CGIF имела ряд выразительных средств, которые существенно увеличивали возможности языка по представлению знаний ([4]), но усложняли его формальную логическую интерпретацию. К числу наиболее важных модификаций CGIF, опущенных в стандарте CL, могут быть отнесены:

- аппарат лямбда-выражений, позволявший применять параметризованные шаблоны спецификаций;
- иерархии типов концептов и отношений;
- нормативная структуризация баз знаний с определением специализированных предопределенных контекстов «CatalogOfIndividuals» («каталог индивидуумов»), «TypeHierarchy» («иерархия типов концептов»), «RelationHierarchy» («иерархия типов отношений») и «Assertion» (контекст «утверждений»);

- средства отображения множеств и последовательностей;
- расширенный механизм спецификации квантификаторов.

Возможность формального приведения расширенной версии CGIF из стандарта ISO/IEC 14481 к абстрактному синтаксису КГ стандарта ISO/IEC 24707 является отдельным предметом рассмотрения (особенно в связи с эксплуатацией целого ряда программных продуктов, использующих CGIF и аппарат КГ и внедренных до появления стандарта CL), однако представляется, что в анализируемом в настоящем докладе классе задач данный вопрос не имеет принципиального значения, и на текущий момент важны лишь общие элементы нотаций КГ, которые и используются далее.

IV. ЗАДАЧА АВТОМАТИЗАЦИИ СИНТЕЗА КГ

Наличие стандартизованных нотаций КГ создает предпосылки для решения ряда типовых классов задач NLP на базе КГ. Важное место среди данных задач занимает автоматизация построения КГ на основании обработки текстовой информации. Одним из возможных вариантов постановки указанной задачи является ее рассмотрение как задачи автоматизации перевода входных текстов на язык CGIF. В рамках настоящего доклада решение этой задачи связывается с использованием технологий машинного обучения на базе нейронных сетей ([5, 6]). В прикладном аспекте подобное решение подразумевает создание информационной системы (или программной платформы), выполняющей соответствующие функции, а именно:

- управление исходными данными для обучения нейронных сетей, используемых при автоматизированном переводе;
- поддержка процесса обучения;
- реализация автоматизированного перевода.

При рассмотрении подходов к организации обучения в исследуемом контексте автоматизации перевода должны исходно учитываться некоторые особенности нотаций КГ, среди которых наиболее важными представляются следующие:

- прямое использование в CGIF-описаниях информации, отсутствующей в исходных текстах на ЕЯ, включая:
 - идентификаторы типов концептов и отношений;
 - идентификаторы отношений;
 - квантификаторы;
 - структуру и идентификаторы контекстов;
 - способы группировки концептов и вложенных КГ;
- возможность описания связей между узлами КГ с использованием определяющих и связанных меток (defining label и bound label соответственно), заменяющих идентификаторы концептов и отношений в CGIF-текстах;

- полиморфность КГ и, соответственно, их спецификаций на языке CGIF (в том смысле, что одно и то же семантическое содержание может быть в общем случае выражено различными способами и, как следствие, описано различающимися КГ);
- характеристики отношений, не относящихся к логике первого порядка, в CGIF не регламентируются, что, в том числе, означает, что нормативно не определены ни арность, ни математические свойства отношений, ни выделение подмножества отношений-акторов, ни другие характеристики, которые могли бы быть использованы при переводе.

Как видно из приведенного перечисления, некоторые сложности задачи представления текстов на CGIF, имеют принципиальный характер и частично неустранимы. В связи с этим исходная задача формализованной трансляции «произвольный текст → CGIF» требует корректировки и введения соответствующих ограничений. При этом следует учитывать, что на текущий момент может рассматриваться только начальная фаза эволюционного процесса разработки программной платформы автоматизации синтеза моделей КГ. Кроме того, на соответствующие фазы может быть разделен и рассматриваемый процесс обучения нейронных сетей, ориентированных на применение в среде целевой платформы. Представляется, что указанные фазы могут быть определены следующим образом:

- 1) обучение переводу элементарных конструкций;
- 2) обучение переводу завершенных контекстов низших порядков (под порядком контекста в данном случае понимается его уровень вложенности в другие контексты);
- 3) обучение переводу текстов.

Реализация каждой из перечисленных выше фаз в общем случае может сопровождаться самостоятельной подготовкой исходного материала (примеров, словарей и т.п.). Совокупность выделенных фаз может рассматриваться и как циклически повторяемая единая процедура, обеспечивающая поэтапное обучение с повышением объема и уровня обрабатываемого контекста (слова, словосочетания, простые и сложные предложения, абзацы, разделы, законченные тексты). На начальном этапе создания рассматриваемой программной платформы предметом исследования должны стать фазы 1 (обучение переводу элементарных конструкций) и 2 (обучение переводу завершенных контекстов низших порядков, включая предложения).

Учитывая содержание основных фаз обучения и сформулированные ранее в настоящем параграфе особенности задачи перевода «произвольный текст → CGIF», предлагается принять следующие ограничения:

- 1) автоматическая типизация концептов и отношений при переводе не производится или устанавливается в ходе дополнительной обработки CGIF-текста на основании применения вспомогательных структур данных (словарей, онтологий и т.п.) или прямого редактирования;
- 2) идентификация и свойства (арность, сигнатура, класс и т.д.) отношений в выходных CGIF-спецификациях определяется только содержанием примеров, используемых при реализации обучения;

3) автоматическая квантификация и спецификация групп концептов и КГ при переводе не поддерживаются;

4) предложения входного текста рассматриваются как обособленные вмещающие контексты, идентификация (типизация) которых не регламентируется. При этом сложные предложения обрабатываются как последовательности простых предложений, смысловые связи между которыми на данном этапе не рассматриваются;

5) выбор конкретной структуры КГ из множества возможных определяется только примерами, использованными при обучении.

Перечисленные ограничения не препятствуют достижению основных целей начального этапа разработки и внедрения платформы – создания условий для поэтапного развития инструментальных средств, поддерживающих функции автоматизированного синтеза моделей КГ и обучения основам перевода входных текстов на язык CGIF. На данном этапе первичными являются решения технологического уровня, позволяющие эволюционно наращивать функциональные возможности системы, повышать качество обработки КГ и расширять парк примеров, которые могут в дальнейшем использоваться для обучения нейронных сетей решению более сложных задач приобретения и применения знаний.

V. АРХИТЕКТУРА ПЛАТФОРМЫ

Сформулированные в параграфе IV обобщенные функции рассматриваемой платформы в значительной степени определяют ее состав и функциональную структуру. Однако, помимо этого, представляется необходимым учесть ряд дополнительных требований, вытекающих из предполагаемых условий и задач эксплуатации целевого программного продукта. Указанные требования могут быть охарактеризованы следующим образом:

- платформа должна обеспечивать тестирование обученных нейронных сетей с поддержкой интерактивной коррекции результатов перевода и возможностью повторного использования отредактированных примеров;
- компоненты платформы должны поддерживать предобработку подаваемых на перевод ЕЯ-текстов (включая их структурную декомпозицию) и постобработку CGIF-результатов перевода (включая композицию CGIF-контекстов) с целью адаптации соответствующих данных к структуре и наполнению обученной нейронной сети;
- платформа должна иметь клиент-серверную архитектуру, поддерживать многопользовательский режим эксплуатации и обеспечивать возможность применения как общих, так и частных (задаваемых пользователем) вспомогательных структур данных, ориентированных на специфику конкретной задачи перевода;
- при реализации процессов обучения и перевода должна обеспечиваться возможность независимого обслуживания пар «входной язык – CGIF»;

- архитектура платформы должна обеспечивать возможность последующего расширения номенклатуры функциональных модулей;
- при разработке и программной реализации платформы должно использоваться открытое программное обеспечение.

Основные компоненты платформы и их информационные связи представлены на рис. 1.

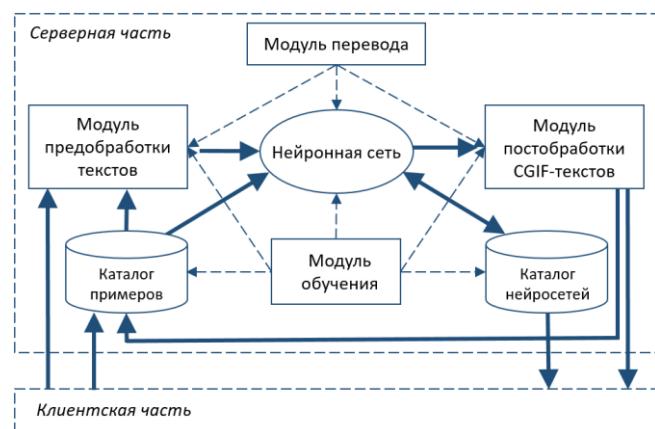


Рис. 1. Обобщенная архитектура платформы

На рисунке не указаны некоторые служебные компоненты платформы (инструменты администрирования, модули работы с каталогами и вспомогательными структурами данных, база данных и т.д.) и сервисные средства (например, модули визуализации и интеграции моделей КГ, генерации отчетов и т.д.), которые потенциально могут войти в состав рассматриваемой платформы. Однако выделенные на рисунке компоненты позволяют содержательно описать основные функциональные операции и процессы, связанные с целевой эксплуатацией исследуемой программной системы. Ниже будет дана краткая характеристика базовых функциональных модулей и информационных массивов платформы, используемых при решении задач обучения и перевода, рассматриваемых в настоящей работе. При этом следует отметить, что в случае поддержки стандарта ISO/IEC 14481 спектр решаемых модулями платформы задач может расширяться.

A. Модуль предобработки текстов

Данный модуль работает как с входными текстами на ЕЯ, подлежащими переводу, так и с текстами (как на ЕЯ, так и на CGIF), задействованными в процессах обучения нейросетей. При этом областью операций для модуля являются элементарные структурные единицы текста, соответствующие законченным контекстам низших порядков в CGIF – слова, словосочетания, предложения. В общем случае модуль выполняет следующие функции:

- токенизация в рамках предложения на ЕЯ (из состава транслируемого текста или примера) или завершенного контекста на CGIF (при предварительной обработке примеров), соответствующего данному предложению;
- лемматизация обслуживаемого фрагмента текста (приведение словоформ к нормальной форме на базе вспомогательных словарей);

- кодирование слов с получением выходного чи-слового вектора, соответствующего исходному предложению (контексту).

Выходными данными модуля предобработки текстов являются подаваемые на вход нейросети вектора, соответствующие либо транслируемым предложениям на ЕЯ (при переводе), либо текстам примеров на ЕЯ или CGIF (при обучении).

Спецификой токенизации CGIF-текстов является интерпретация стандартизованных в данном языке специальных символов (разделителей спецификаций концептов и отношений, типов, меток межузловых связей и ряда др.), а также решение ряда проблем, перечисленных в разделе IV.

Рассмотрим пример, приведенный в тексте стандарта ISO/IEC 24707 (отметим, при этом, что аналогичные примеры могут быть использованы при обучении нейросетевых моделей для рассматриваемой программной платформы). Пусть дано предложение:

John is going to Boston by bus.

Приведенному предложению поставлено в соответствие CGIF-описание:

[Go: *x] [Person: John] [City: Boston] [Bus: *y]

(Agnt ?x John) (Dest ?x Boston) (Inst ?x ?y)

Данное описание однозначно определяет КГ, изображенный на рис. 2.

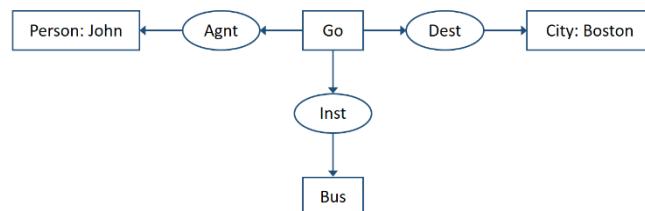


Рис. 2. Пример КГ

Как видно из представленных текстов:

- 1) концепты «John» и «Boston» в результирующей CGIF-спецификации наделены типами («Person» и «City» соответственно), идентификация которых отсутствует в исходном ЕЯ-тексте;
- 2) отношения «Agnt» (быть агентом какого-либо действия), «Dest» (назначение) и «Inst» (инструментальное отношение) не указаны в явном виде во входном предложении на ЕЯ;
- 3) при спецификации межузловых связей КГ в CGIF-описании используются формально заданные метки («x» для концепта «Go» и «y» для концепта «Bus») и специальные символы указания на определения меток («*») и связи с ними («?»).

Все три выделенные выше характеристики результирующей CGIF-спецификации в рассматриваемом примере требуют разрешения соответствующих проблем неопределенности перевода «текст → CGIF» (в том числе, на фазе обучения нейросетевых моделей).

Последняя (третья в приведенном списке) проблема может быть устранена на фазе токенизации путем прямых подстановок идентификаторов концептов и отношений (имеющихся во входном тексте) в точках использования меток. Обратная операция с заменой дублирующих идентификаторов на формальные обозначения меток может осуществляться на фазе постобработки переводимого текста.

При лемматизации CGIF через использование специально размеченных словарей (или иных подобных им по назначению вспомогательных структур данных) может решаться задача типизации концептов и отношений в обучающих примерах, что впоследствии будет отражено и при целевом переводе. Альтернативой этому преобразованию является применение нетипизированных концептов и отношений в выходных CGIF-описаниях с сохранением возможности решения данной задачи при постобработке транслируемого текста.

Решение проблемы неопределенности идентификаторов отношений (вторая проблема в приведенном выше перечне) возможно только на основании явного указания подобных идентификаторов в CGIF-спецификациях примеров. При этом унификация определений отношений, используемых при переводе, является самостоятельной и сложной задачей, которая выходит за рамки рассмотрения настоящего доклада. На текущей стадии развития проекта возможно лишь создание технологических условий для ее решения в будущем путем адаптации соответствующих средств поддержки обучения и управления вспомогательными структурами данных.

B. Модуль постобработки CGIF-текстов

Данный модуль поддерживает постобработку результирующих CGIF-текстов, генерируемых при трансляции входных текстов на ЕЯ или тестовом применении обученных нейросетей. При этом областью действий для модуля являются завершенные контексты низших порядков, соответствующие словам, словосочетаниям и предложениям входных текстов на ЕЯ.

При обработке CGIF-спецификаций основными задачами модуля в общем случае являются:

- декодирование выхода нейронной сети с генерацией выходного CGIF-текста;
- типизация концептов и отношений (в случае решения данной задачи на фазе постобработки CGIF-текстов, а не при обучении);
- обратная подстановка идентификаторов формальных меток, используемых при спецификации межузловых связей в итоговом КГ (при необходимости);
- окончательная редакция расстановки спецсимволов в выходном CGIF-описании (при необходимости).

Данный модуль поддерживает постобработку результирующих CGIF-текстов, генерируемых при трансляции входных текстов на ЕЯ или тестовом применении обученных нейросетей. При этом областью действий для модуля являются завершенные контексты низших порядков, соответствующие словам, словосочетаниям и предложениям входных текстов на ЕЯ.

C. Модуль обучения

На настоящем этапе разработки проекта платформы автоматизации построения КГ-моделей модуль обучения рассматривается как средство обучения нейросетей переводу элементарных структурных единиц входного ЕЯ-текста (до предложения включительно). При развитии проекта возможно расширение функций модуля до масштаба обработки целостных текстов, корпусов документов (например, при обучении в рамках предметных областей) и т.д. Однако на текущий момент представляется, что основные задачи, решаемые рассматриваемым компонентом платформы, должны сводиться к следующему перечню:

- организация согласованной работы модулей пред- и постобработки в ходе подготовки и применения обучающих примеров;
- непосредственное обучение нейросетей построению моделей КГ законченных контекстов низших уровней (до уровня предложения входного текста включительно);
- поддержка интерактивного тестирования обученных нейросетей с возможностью редактирования выходных CGIF-спецификаций и их повторного использования в процессе дообучения;
- управление операциями загрузки и выгрузки данных в каталоги примеров и обученных нейросетей.

D. Модуль перевода

Модуль перевода управляет реализацией полного процесса непосредственной трансляции входного ЕЯ-текста в CGIF-представление. В перспективе данный модуль должен быть способен решать следующие функциональные задачи:

- графематический анализ входного текста с его структурной декомпозицией и выделением контекстов низших порядков (в частности, простых предложений), подлежащих непосредственному автоматическому переводу на язык CGIF;
- выбор и загрузка требуемой обученной нейросети, используемой при автоматическом переводе;
- реализация цикла перевода фрагментов входного текста для контекстов низших уровней на базе выбранной нейросетевой модели;
- организация совместной работы модулей текстовой пред- и постобработки в ходе процесса перевода;
- сборка контекстов низших порядков в контексты высших порядков для выходного CGIF-текста;
- оформление специальных контекстов (например, конструкций if-then, either-or и др.), не обслуживаемых на уровне контекстов низших порядков;
- генерация описаний квантификаторов, не подлежащих определению при переводе контекстов низших порядков;
- установление так называемых кореферентных связей (т.е., связей между описаниями совпадающих или тождественно эквивалентных понятий, заданными в различных контекстах), что может

быть связано с использованием дополнительных вспомогательных структур данных или специальных дополнений к уже применяемым справочникам, онтологиям и т.п.;

- выполнение сервисных функций (например, ведение статистики, протоколирование, работа с архивом переводов и т.п.).

E. Каталоги примеров и нейросетей

В рамках тематики настоящего доклада каталог примеров рассматривается как набор исходных данных для обучения нейросетей генерации CGIF-спецификаций для контекстов низших порядков. В общем случае структура и содержание данного каталога могут существенно варьироваться в зависимости от выбранного функционального профиля целевой платформы (например, поддержка решения задач построения КГ для текстов на различных ЕЯ, обучение специализированным переводам и т.п.). Существенным фактором является и многопользовательский режим работы платформы, предполагающий возможность наличия у пользователей (или их ролевых групп) определенных предпочтений в части формирования и выбора нейросетевых моделей, используемых при целевом переводе. На текущий момент представляется, что достаточной является поддержка механизма общих и частных обучающих наборов данных, которые могли бы определяться пользователями и/или администраторами платформы.

Каталог нейросетевых моделей по аналогии с каталогом примеров может структурироваться на основе разделения общих и частных обученных сетей. Выбранные из каталога модели смогут загружаться в систему как для дообучения, так и для применения в процессах перевода. Потенциально возможно (при соответствующей адаптации модуля перевода) и параллельное использование каталогизированных нейросетей для обработки различных текстовых фрагментов или получения вариантов перевода одного и того же фрагмента (например, в целях последующей оптимизации результата, верификации и т.п.).

Для программной реализации каталогов может быть использована как база данных (включая NoSQL), так и файловая система сервера приложений платформы. Более предпочтительным представляется вариант с базой данных, учитывая принятую клиент-серверную архитектуру и многопользовательский режим работы системы. При этом вопросы выбора конкретной СУБД и структуры самой базы данных должны решаться на основании анализа реальных задач и технических условий эксплуатации целевой платформы.

F. Общие сценарии эксплуатации платформы

Как следует из общего содержания настоящего доклада, первичными функциями платформы на текущем этапе развития проекта могут считаться:

- формирование обучающих наборов данных, ориентированных на последующее использование при решении задач автоматизации построения моделей КГ (специфицированных на языке CGIF) на базе текстовой информации, представленной на ЕЯ;

- предоставление средств автоматизации синтеза CGIF-описаний КГ (на базе ЕЯ-текстов) и обучения нейросетевых моделей выбранного вида решению соответствующих задач автоматического перевода.

Как видно из изображенной на рис. 1 обобщенной архитектуры, пользователи платформы имеют возможность выполнения следующих действий:

- загрузка частных примеров в соответствующий каталог платформы;
- обучение выбранной нейросети на задаваемом пользователем наборе данных (с возможностью занесения обученной нейросети в соответствующий каталог платформы);
- загрузка текстов примеров (на ЕЯ и CGIF) и подготовка (с возможностью интерактивного тестирования и редактирования) примеров для каталогизации в среде платформы;
- построение моделей КГ на основании автоматического перевода загруженных пользователем ЕЯ-текстов в форму CGIF-описаний (на базе выбранного пользователем экземпляра обученной нейросети);
- выгрузка выбранных наборов примеров для применения в задачах обучения нейросетей альтернативной архитектуры;
- выгрузка обученных нейросетей для их дальнейшего использования вне среды платформы.

Доступ пользователей к рассматриваемым информационным и функциональным ресурсам платформы может регламентироваться централизованными средствами администрирования, не отмеченными на рис. 1, но являющимися неотъемлемым компонентом системы.

Представляется, что даже в варианте с обучением переводу контекстов низших порядков платформа способна существенно содействовать как решению практически значимых задач представления знаний на базе аппарата КГ, так и исследовательской деятельности в соответствующей сфере. Кроме того, платформа может рассматриваться как компонент более сложных систем и технологий семантической обработки текстов.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время на кафедре Автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в инициативном порядке выполняется проект разработки программной платформы, соответствующей рассмотренной в данном докладе. К настоящему моменту получены первичные программные реализации модулей обучения, перевода (в части обслуживания контекстов низших порядков), а также пред- и постобработки текстов (см. рис. 1).

В качестве базового инструмента принят язык Python. Для поддержки типовых задач обработки нейронных сетей в проекте использована библиотека TensorFlow, а в

части задач NLP – библиотеки NLTK (Natural Language Toolkit) и ruromphry2 (для ряда операций с русскоязычным контентом на базе словарей OpenCorpora). Клиент-серверная архитектура реализована с помощью фреймворка Flask.

В значительной степени функциональные возможности и качественные свойства платформы определяются принятыми в проекте структурами нейросетевых моделей и методами их обработки. На текущем этапе разработки в роли рабочей версии выбрана пятислойная конфигурация нейросети с чередованием слоев Embedding, LSTM, RepeatVector, LSTM и TimeDistributed (в терминах определений TensorFlow). Дополнительно исследуется применение моделей класса Transformer.

Основными задачами текущего этапа разработки платформы можно считать:

- анализ эффективности и совершенствование реализованного механизма обучения;
- апробация перевода с привлечением различных выразительных возможностей нотаций CGIF и соответствующей модернизацией разработанного программного обеспечения;
- расширение функциональности модуля перевода;
- разработка, реализация и интеграция в платформу базы данных, ориентированной на поддержку каталогов примеров и обученных нейросетей, а также вспомогательных структур данных, используемых различными компонентами системы;
- разработка и реализация сервисных средств.

Представляется, что полноценная реализация рассматриваемой программной платформы и ее внедрение смогут положительно повлиять на общую ситуацию с применением аппарата КГ в широком классе задач интеллектуальной обработки данных и знаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. John F. Sowa. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations, Brooks Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA USA, 2000. – 594 p.
2. Michel Chein, Marie-Laure Mugnier. Graph-based Knowledge Representation – Computational Foundations of Conceptual Graphs. Advanced Information and Knowledge Processing. – Springer, 2009. – ISBN 978-1-84800-285-2. – P. 1-427.
3. ISO/IEC 24707:2018 Information technology – Common Logic (CL): a framework for a family of logic-based languages. International Organisation for Standardisation (Second Edition).
4. Власенко С.В., Варчев Д.А. Использование аппарата концептуальных графов в задачах представления и обработки знаний: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2009. – 64 с.
5. Диковицкий В.В. Семантический анализ текста с применением нейросетевого анализа морфологии и синтаксиса // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – №. 3-8 (8). – С. 109-115.
6. Торина Д.А., Пальмов С.В. Применение нейронных сетей в обработке естественного языка // Журнал прикладных исследований. – 2023. – №. 7. – С. 158-162.

Система машинного зрения для определения степени загрузки шахты цепного дефибрера

Ковалёв Дмитрий Александрович

Высшая школа технологии и энергетики

Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна

Санкт-Петербург, Россия

d.a.kovalyov@yandex.ru

Бахтин Андрей Владимирович

Высшая школа технологии и энергетики

Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна

Санкт-Петербург, Россия

bahtin73@mail.ru

Аннотация. Цепной дефибрер является одним из ключевых элементов в цепи подготовки древесной массы. Однако, несмотря на его значимость, контроль за процессом обработки и оценка качества выходного продукта во многом остаются ручными и недостаточно эффективными. Это приводит к потерям как в количественном, так и в качественном отношении, что непосредственно оказывается на экономических показателях предприятия. Создание системы машинного зрения для мониторинга видимой части шахты может стать решением указанных проблем. Система машинного зрения позволит в реальном времени анализировать состояние древесной массы на выходе из дефибрера, рассчитывать её объем и оценивать качество обработки. Это, в свою очередь, обеспечит оперативное регулирование параметров работы оборудования, минимизацию отходов производства и повышение общей производительности цеха.

Abstract. The chain defibrer is one of the key elements in the wood pulp preparation chain. However, despite its importance, control over the processing process and evaluation of the quality of the output product remain largely manual and insufficiently effective. This leads to losses both quantitatively and qualitatively, which directly affects the economic performance of the enterprise. The creation of a machine vision system for monitoring the visible part of the mine can be a solution to these problems. The machine vision system will allow real-time analysis of the state of the wood pulp at the exit from the defibrer, calculate its volume and evaluate the quality of processing. This, in turn, will ensure the operational regulation of equipment operation parameters, minimize production waste and increase the overall productivity of the workshop.

Ключевые слова: цепной дефибрер, древесная масса, машинное зрение, расчет объема загрузки, компьютерная программа.

Keywords: chain defibrer, wood pulp, machine vision, calculation of loading volume, computer program.

I. ВВЕДЕНИЕ

В композиции газетной бумаги древесная масса составляет около 75%, остальное – около 24% сульфитная целлюлоза, наполнители, красители, клей.

Для писчих и печатных бумаг высокой гладкости требуется жирная и тонкоразработанная масса, которая легче поддается уплотнению и каландрированию.

Производство древесной массы производится на дефибрерах, где суть процесса заключается в истирании окоренного, мерного баланса на дефибрерных камнях при подаче горячей (оборотной) воды. Производительность дефибрера около 50 кубометров в сутки или в пересчет на производство 45-50 тонн воздушно-сухой древесной массы.

Дефибрерный камень, на котором производится истирание древесной массы вращается от синхронных электродвигателей мощностью от 2100 до 3800 киловатт, частотой вращения двигателей 250-300 оборотов в минуту.

Дефибривание – достаточно энергозатратный процесс: удельное потребление электроэнергии на 1 тонну древесной массы около 1200 киловатт в час. Устройство цепного дефибрера приведено на рис. 1.

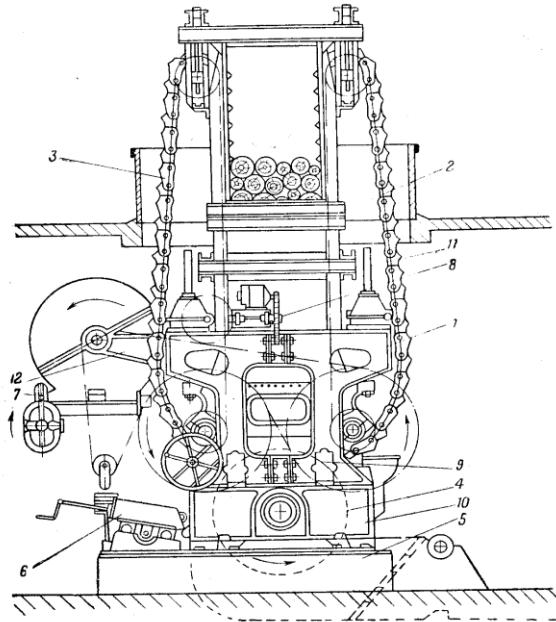


Рис. 1. Устройство цепного дефибрера, где 1 – станина-рама; 2 – верхняя подвижная шахта; 3 – рабочие цепи; 4 – дефибрерный камень; 5 – ванна дефибрера; 6 – ковочный аппарат; 7 – механизм привода к рабочим цепям; 8 – механизм для перемещения подвижной шахты в вертикальном направлении; 9 – смотровые люки; 10 – съемная часть рамы для смены камня; 11 – шпиндель; 12 – кронштейн механизма привода цепей

Баланс длиной 1,25 м загружается в шахту на вращающийся камень, затем включается привод цепей, который начинает двигаться, прижимая баланс к камню. Диаметр дефибрерного камня – 1800 мм. Ширина – 1370 мм. Число оборотов камня – 245 об/мин. Суточная производительность приблизительно 50 т древесной массы. Камень дефибрера погружен в ванну, обязательно подается горячая вода на орошение камня. Внешний вид камня представлен на рис. 2.



Рис. 2. Дефибрерный абразивный камень

II. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ ШАХТЫ ДЕФИБРЕРА

Последние общедоступные исследования касающиеся повышения эффективности и модернизации цепных дефибреров датируются периодом с 1990 по 2000 годы [1–5].

Для эффективной работы системы, была разработана программа, сортирующая мелкий – до 16 см и крупный – от 16 см балансы. Это поможет системе машинного зрения быстрее обрабатывать поступающие данные.

С помощью сегментированного изображения можно различить крупный и мелкий баланс. Алгоритм заключается в том, чтобы для каждого торца баланса определить вписанный в него прямоугольник. Тогда диаметром можно будет считать диагональ прямоугольника.

Изображение изучается сначала обходом изображения слева направо. Необходимо найти определённое количество в ряд идущих активных пикселей. Экспериментальным путём минимальное количество в ряд идущих активных пикселей выбрано равным 36, максимальное 120. Затем с концов получившегося отрезка вниз опускаются два отрезка, длина которых ограничена максимальным числом (120) или встречей с неактивным пикселям. Определив эти три отрезка, можно начать изучение области. Если ширина прямоугольника меньше минимального отрезка высоты в более чем два раза или наоборот, или максимальная высота больше 120, то прямоугольник считается неверным. Если высоты прямоугольника различаются более чем в 1,5 раза, то в качестве диаметра выбирается максимальное значение между значением диагонали прямоугольника с минимальной высотой, и значением минимальной высоты. Если высоты прямоугольника различаются менее чем в 1,5 раза, то в качестве диаметра выбирается максимальное значение между значением диагонали прямоугольника с максимальной высотой, и значением максимальной высоты. Таким же образом изображение изучается сверху вниз, с теми же настройками.

На рис. 3 представлено исходное и сегментированное изображение, также информация о крупных и мелких балансах.

Отклонения рассчитанных системой машинного зрения значений имеют диапазон 0,405–2,691 м³. Среднее отклонение – 1,819 м³. Данные отклонения приемлемы, однако они могут быть связаны с тем, что на изображении видно не всё количество поступающего баланса, а также с погрешностями, связанными с его длинами. Также допускается, что измерительные приборы на производстве имеют неточности или требуют повторных проверок.

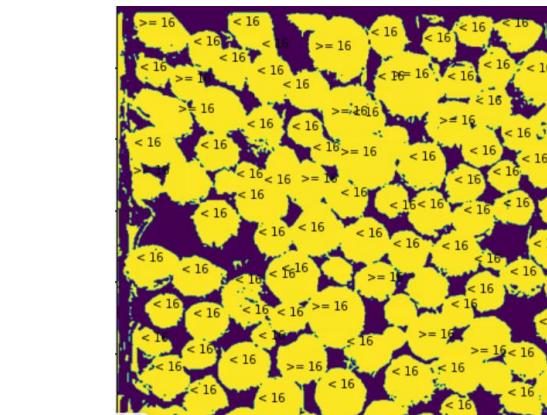


Рис. 3. Исходное и сегментированное изображение для сортировки крупного и мелкого баланса

Интерфейс программы приведен на рис. 4.

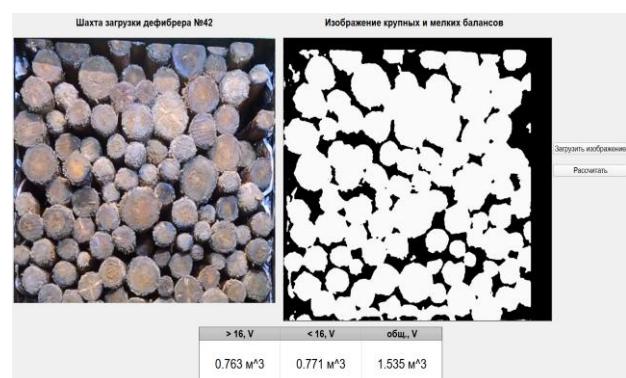


Рис. 4. Предлагаемый интерфейс экрана в пультовой оператора

По действию кнопки «Загрузить изображение» на экране появляется изображение видимой части шахты в текущий момент времени работы дефибрера. По действию кнопки «Рассчитать объем» появляется обработанное изображение и таблица с информацией об общем объеме предполагаемой выработанной древесной массы, а также об объеме мелкого и крупного баланса раздельно.

Блок-схема данной программы представлена на рис. 5.

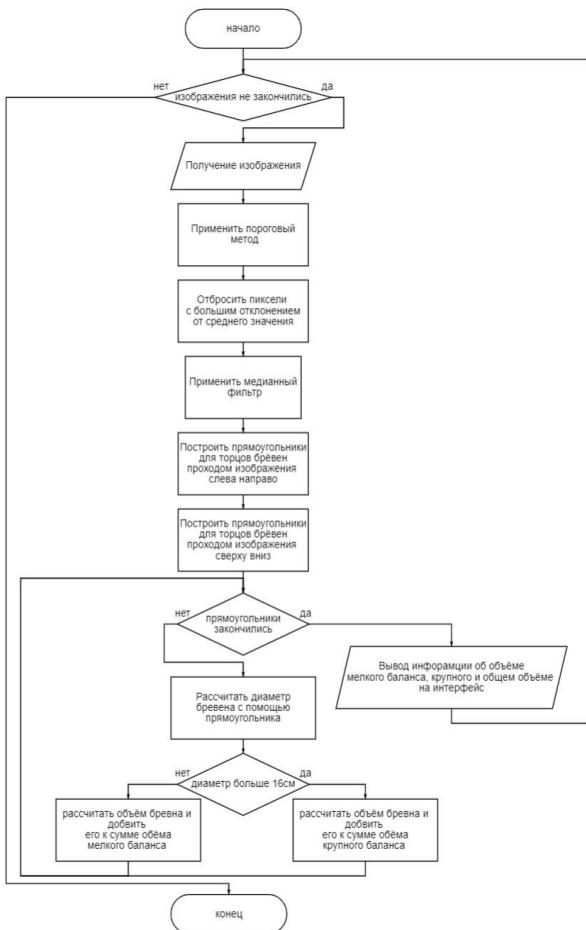


Рис. 5. Алгоритм расчета общего, крупного и мелкого балансов

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение системы машинного зрения в технологический процесс цепного дефибрера обещает улучшения в производственной эффективности. Ожидается снижение потерь сырья и повышение качества древесной массы благодаря более точному контролю и сортировке. Автоматизация процессов позволит снизить нагрузку на операторов и уменьшить вероятность ошибок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на полезную модель № 6235 У1 Российская Федерация, МПК G01F 17/00. Устройство для определения объема переработанной цепным дефибрером древесины: № 96111116/20: заявл. 03.06.1996: опубл. 16.03.1998 / З.И. Карлинский, С.Н. Бусурин; заявитель Ковровский технологический институт. – EDN SLLSEM.
2. Соколов М.И. Совершенствование режимов электропотребления главного привода цепных дефибреров: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы": автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – Иваново, 1996. – 18 с. – EDN ZLMSGR.
3. Авторское свидетельство № 1680846 А1 СССР, МПК D21B 1/04. Способ управления процессом дефибрирования: № 4718140: заявл. 11.07.1989: опубл. 30.09.1991 / А.В. Потанин, О.Е. Теребило, Н.Т. Мазунин [и др.]; заявитель Пермский политехнический институт. – EDN FHYMTE.
4. Авторское свидетельство № 1551761 А1 СССР, МПК D21B 1/20. Способ управления обработкой поверхности дефибрерного камня: № 4367058: заявл. 12.01.1988: опубл. 23.03.1990 / О.Е. Теребило, А.В. Потанин, Н.Т. Мазунин [и др.]; заявитель Пермский политехнический институт. – EDN GCNVJY.
5. Авторское свидетельство № 1573065 А1 СССР, МПК D21B 1/04, H02J 3/12. Способ автоматического управления процессом дефибрирования: № 4440333: заявл. 13.06.1988: опубл. 23.06.1990 / О.Е. Теребило, А.В. Потанин, Н.Т. Мазунин [и др.]; заявитель Пермский политехнический институт. – EDN DDRYFM.

Интеллектуальная разгрузка вычислений в сетях LoRaWAN для промышленного интернета вещей с использованием мягкого алгоритма «Актор-Критик»

Мутанна Мохаммед Салех Али
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
muthanna@sfedu.ru

Целых Алексей Александрович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
tselykh@sfedu.ru

Аннотация. Промышленный Интернет вещей (ПоТ) часто включает в себя мобильные устройства с ограниченными вычислительными ресурсами и мощностью аккумулятора. Поскольку количество устройств ПоТ продолжает расти, возникают серьезные проблемы, особенно в управлении потреблением энергии и минимизации задержек во время разгрузки вычислений. Ранее были предложены различные стратегии для решения этих проблем, особенно в сценариях, включающих однопользовательские и многопользовательские конфигурации в сетях ПоТ. Одним из многообещающих достижений в этой области является принятие стека 6TiSCH (IPv6 в режиме переключения каналов с временным интервалом IEEE 802.15.4e), который стал новым стандартом промышленных коммуникаций. Ключевые проблемы, такие как задержка и энергоэффективность, требуют инновационных решений. Для решения этих проблем в этом исследовании представлен эффективный механизм разгрузки вычислений на уровне граничного слоя, использующий мягкий алгоритм «Актор-Критик» (Soft Actor-Critic, SAC) для снижения потребления энергии во время процесса разгрузки. Мы оценили эффективность предлагаемого подхода с использованием инструмента моделирования Сооja в операционной системе Contiki 3. Сравнительный анализ с существующими методами показал, что предлагаемый подход значительно снижает задержку (на 20,4-40 мс) и потребление энергии (на 12-28,8 Дж) в слое 6TiSCH, а также дополнительно снижает задержку (на 20,4-40 мс) и потребление энергии (на 13,6-34,8 Дж) в граничном слое. В целом предлагаемое решение улучшает пропускную способность (на 322-508,8 Кбит/с), снижает коэффициент задержки пакетов (на 4,6%-8%), сквозную задержку (на 6-9 с) и повышает эффективность (на 7,8%-14,6%). Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемый нами подход превосходит существующие методы по некоторым ключевым показателям производительности.

Abstract. The Industrial Internet of Things (IoT) often involves mobile devices with limited computational resources and battery power. As the number of IoT devices continues to grow, significant challenges arise, particularly in managing energy consumption and minimizing time delays during computational offloading. Various strategies have been proposed to address these challenges, particularly in scenarios

involving single-user and multi-user configurations within IIoT networks. One promising advancement in this field is the adoption of IPv6 over time-slotted channel hopping (6TiSCH), which has emerged as a new standard for industrial IoT communications. Key industry challenges such as latency and energy efficiency necessitate innovative solutions. To mitigate these issues, this study introduces an effective offloading mechanism at the Edge layer, employing the Soft Actor-Critic (SAC) algorithm to reduce energy consumption during the offloading process. The proposed approach was evaluated using the Cooja simulation tool with Contiki 3 OS. Comparative analysis with existing methods demonstrated that the proposed approach significantly reduces latency (20.4ms to 42ms) and energy consumption (12J to 28.8J) in the 6TiSCH layer, and further decreases latency (20.4 to 40ms) and energy consumption (13.6J to 34.8J) in the Edge layer. Overall, the proposed solution improves throughput (322Kbps to 508.8Kbps), packet delay ratio (4.6% to 8%), end-to-end delay (6s to 9s), and efficiency (7.8% to 14.6%). The experimental results indicate that our proposed approach outperforms existing methods in several key performance metrics.

Ключевые слова: промышленный Интернет вещей, разгрузка вычислений, граничные вычисления, задержка, LoRaWAN

Keywords: Industrial IoT, computational offloading, edge computing, latency, LoRaWAN.

I. ВВЕДЕНИЕ

В связи с резким увеличением количества подключенных устройств Интернета вещей (IoT) особую актуальность имеет обеспечение поддержки их работоспособности [1]. Ожидается, что к 2025 году количество подключенных устройств составит порядка нескольких миллиардов, и, следовательно, IoT должен обеспечить надежную систему для такого огромного количества объектов. Большинство этих устройств работают от батареи, что накладывает ограничения на дизайн сетей IoT. LPWAN сети являются одними из наиболее развитых и имеющих наибольшее число реализаций сетей Интернета вещей [2], которые привлекли внимание исследователей и бизнеса. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими парадигмами IoT, так как обеспечивают

энергоэффективность и широкий диапазон охвата. LoRa является одной из наиболее эффективных технологий среди тех, которые были использованы для LPWAN. В последнее время LoRaWAN широко используется в качестве сети IoT для различных приложений Интернета вещей. Поэтому ее следует рассматривать наиболее подходящей для большинства вновь развертываемых сред. Тем не менее, есть много проблем, связанных с протоколом LoRaWAN, которые еще не решены [3]. Одной из основных проблем является плотное развертывание сенсорных устройств. Таким образом, LoRaWAN должна быть адаптирована для работы сверхплотных сетей с обеспечением требуемых характеристик. Огромное количество подключенных к сети устройств приводит к повышенному объему трафика, который влияет на работу всей сети. Другой проблемой является сквозная задержка передачи данных, связанная с приложениями, которые работают в сетях LoRaWAN [4].

На стадии проектирования одним из критичных вопросов является определение мест установки и количества базовых станций для выбранного сектора, в котором планируется разворачивание сегмента сети, что позволит обеспечить уверенный прием в любой точке данного сектора. Так как LoRa является радиотехнологией, то сигнал естественным образом подвержен затуханию на пути своего распространения в силу разных причин, таких как расстояние между базовой станцией и конечным устройством, наличие препятствий между ними, взаимовлияние с другими сигналами, передаваемыми на той же частоте, и так далее. Таким образом, в сетях LoRaWAN есть проблемы, связанные с энергетическими ограничениями и большим количества трафика, возникающего из-за огромного количества подключаемых устройств.

Учитывая все вышеперечисленное, рассмотрим подходы к эффективной разгрузке вычислений в сетях промышленного интернета вещей на основе LoRaWAN с использованием мягкого алгоритма «Актор-Критик», в первую очередь, для снижения потребления энергии.

II. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

LoRaWAN – это протокол уровня управления доступом к среде (MAC), разработанный для крупномасштабных публичных сетей с одним оператором. Он использует физический уровень LoRa, облегчая связь между удаленными узлами и шлюзами, подключенными к сетевым серверам, тем самым играя важную роль в решениях IoT [5]. Архитектура LoRaWAN (рис. 1), в основном, иерархическая и состоит из следующих элементов:

- Конечные устройства – обычно это маломощные датчики или исполнительные устройства, которые взаимодействуют со шлюзами с помощью односкачковой беспроводной связи.
- Шлюзы, которые отвечают за прием передач от нескольких конечных устройств и пересылку данных на сетевой сервер.
- Сетевой сервер, который управляет связью в сети, контролируя такие операции, как настройка адаптивной скорости передачи данных (ADR) и дедупликация сообщений.

Преимуществами LoRaWAN являются: обеспечение связи на больших расстояниях, особенно в сельских и удаленных районах [6], низкое потребление энергии –

технология позволяет устройствам, работающим от батареи, функционировать годами [7], а также шифрование и целостность данных [8, 9]. Для управления всей сетью и снижения перегрузки были введены граничные (периферийные) вычисления. В среде интеллектуальной промышленности высокие сетевые накладные расходы являются серьезной проблемой. Граничный сервер управляет действиями задач и уменьшает объем данных, выгружаемых на облачный сервер, что снижает накладные расходы и сетевую задержку промышленной среды. Табл. 1 показывает сравнение основных характеристик граничных и туманных сред.

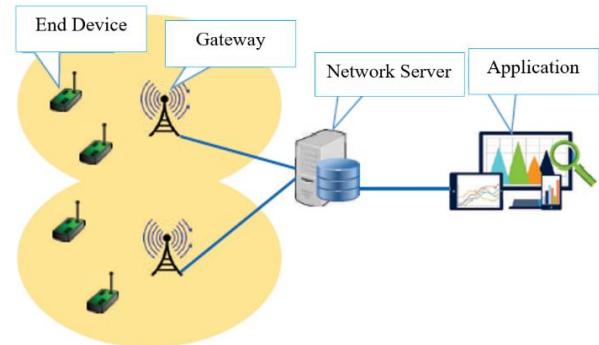


Рис. 1. Архитектура сети LoRaWAN

Мобильные устройства IoT, включая датчики, смартфоны и ноутбуки, являются частью новой революционной технологии Интернета вещей IoT. Одним из приложений является совместное использование транспортных средств (Connected Vehicles), включая велосипеды [10], где особенно важно удовлетворить растущие требования пользователя опыта (UX), которые выражаются в таких характеристиках IoT, как качество обслуживания (QoS) [11–14].

ТАБЛИЦА 1. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАНИЧНЫХ И ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Характеристики	Граничные вычисления	Туманные вычисления
Расстояние от пользователей	Ближе к пользователям	Не ближе, чем граничные узлы
Тип сети доступа	Базовая станция, 5G, 4G и т. д.,	Беспроводные точки доступа
Энергосбережение	Высокая экономия	Умеренная экономия
Место для установки	Предпочтительное местоположение – базовая станция	Развертывание в частных и общественных местах
Управление сетью	Управление внутренним бизнесом и поставщиками услуг	Управление только внутренним бизнесом
Стоимость установки	Больше	Меньше
Право собственности	Мобильные пользователи	Владельцы внутреннего бизнеса
Тип устройств по пользователям	Мобильные устройства	Носимые устройства
Аппаратное обеспечение серверов	Центры обработки данных, которые небольшие	Серверы малого масштаба
Масштабируемость сети	Высокая	Умеренный
Топология сети	Быстро распределенные	Слабо распределенный
Применение сети	Сверхнизкая задержка	Низкая задержка

В [15] был предложен новый подход под названием TSCH-Sim для моделирования сетей TSCH и LoRaWAN. Были рассмотрены преимущества маломощных беспроводных сетей в промышленном Интернете вещей (ПоТ), и произведена оценка производительности этих сетей. Были проанализированы существующие симуляторы, такие как симулятор LoRaWAN и другие симуляторы, такие как Opensim, ns-3 и OMNeT++, и сделаны выводы об их неэффективности при моделировании сети TSCH с большим количеством узлов. Моделирование сети TSCH состояло из трех слоев, а именно: канального или уровня устройств, сетевого уровня и уровня интерфейсов. Протокол для эффективного сбора данных в целях достижения надежности в беспроводных сетях, устойчивых к отказам и задержкам, был предложен в [16]. В частности, был рассмотрен подход, при котором выбирались релайные узлы в сети, им разрешалось передавать пакеты, в то время как другие узлы переводились в спящий режим с целью повышения энергоэффективности, что приводило к увеличению срока службы сети. Потеря пакетов при этом уменьшается за счет перевода всех узлов в режим пробуждения, когда вероятность переполнения буфера была вычислена равной нулю. Моделирование CoopStor было выполнено в Союзе. Циклическое режим работы узлов было реализовано на основе трафика и скорости перегрузки с целью улучшения срока службы сети, но отсутствие учета приоритета разнородных пакетов приводило к потере пакетов и увеличению повторных передач.

III. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К РАЗГРУЗКЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ С УЧЕТОМ РИСКА

На этом этапе проблема заключается в разгрузке нескольких задач с корневого узла на несколько ребер в централизованной среде. Разгрузка с учетом риска обеспечивает лучшую производительность без какого-либо вмешательства злоумышленников, которые пытаются скомпрометировать граничный сервер, чтобы тратить энергию и ресурсы. Решая эту проблему, в данной работе мы сосредоточились на алгоритме глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL) с несколькими локальными граничными узлами,ключенными в глобальную среду граничного сервера. Выбор граничного узла для разгрузки рассматривает два случая:

- разгрузка задач с корневого узла на граничный сервер;
- разгрузка задач между граничными серверами.

При этом учитываются несколько критериев, такие как Доступность ресурсов (Ra_{E_i}), Нагрузка (Γ), Энергия (Er_{E_i}) Расстояние ($D_{N,E}$), Уровень риска граничного узла (R_L). Под нагрузкой понимается текущая нагрузка, вычисленная граничным узлом, а под расстоянием – расстояние между корневым узлом и граничным сервером. Уровень риска граничного узла учитывается при выборе граничного узла с низким уровнем риска для безопасной обработки данных. Риск граничного сервера можно описать формулой:

$$R_L^t(E_i) = \zeta^t(E_i) \times \eta^t(E_i) \times \theta^t(E_i) \times e^{(t-t_n) \cdot g^t(E_i)}, \quad (2)$$

где $\zeta^t(E_i)$ обозначает ценность граничного сервера в момент времени t , которая может иметь одну из трех степеней, как показано в табл. 2. Ценность граничного сервера зависит от ресурсов и производительности соответствующего сервера.

ТАБЛИЦА 2. СТЕПЕНИ ЦЕННОСТИ СЕРВЕРА

Ценность, значение	Степень	Описание
$0 \leq \zeta^t(E_i) \leq 0.5$	Низкий	Границевые узлы, обладающие малыми ресурсами (ЦП, память и энергия), а также достигающие высокой задержки
$0.5 \leq \zeta^t(E_i) \leq 0.75$	Умеренный	Границевые узлы, обладающие умеренными ресурсами и задержкой
$0.75 \leq \zeta^t(E_i) \leq 1.0$	Высокий	Границевые узлы, обладающие высокими ресурсами и низкой задержкой

$\eta^t(E_i)$ в (2) обозначают уязвимость в момент времени, которая может иметь одну из трех степеней, как показано в табл. 3. Уязвимость зависит от степени воздействия, которое она окажет на сервер.

ТАБЛИЦА 3. СТЕПЕНИ УЯЗВИМОСТИ

Уязвимость, значение	Степень	Описание
$0 \leq \eta^t(E_i) \leq 0.5$	Низкий	Раскрытие уязвимости приводит к управляемому воздействию
$0.5 \leq \eta^t(E_i) \leq 0.75$	Умеренный	Раскрытие уязвимости приводит к умеренному воздействию
$0.75 \leq \eta^t(E_i) \leq 1.0$	Высокий	Раскрытие уязвимости приводит к критическому воздействию

$\theta^t(E_i)$ в (2) обозначим возможность угрозы, которая возникает в момент времени, и может иметь одну из трех степеней, как показано в табл. 4. Возможность угрозы зависит от степени возникшей угрозы.

ТАБЛИЦА 4. СТЕПЕНИ ВОЗМОЖНОСТИ УГРОЗЫ

Возможность угрозы, значение	Степень	Описание
$0 \leq \theta^t(E_i) \leq 0.5$	Низкий	Угроза слабая и осуществляется неопытным противником
$0.5 \leq \theta^t(E_i) \leq 0.75$	Умеренный	Угроза сильна, но ее можно легко нейтрализовать
$0.75 \leq \theta^t(E_i) \leq 1.0$	Высокий	Угроза очень сильна и ее очень трудно нейтрализовать

Термин $g^t(E_i)$ обозначает скорость увеличения или уменьшения угрозы конкретного граничного сервера, которая вычисляется на основе прошлых временных шагов. Предположим, что есть пять граничных серверов $E_i = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\}$, расчет риска этих граничных серверов представлен в табл. 5. Мы вычисляем риск только для текущего времени независимо от $g^t(E_i)$.

ТАБЛИЦА 5. РАСЧЕТ РИСКА ГРАНИЧНЫХ СЕРВЕРОВ

Идентификация узла	Стоимость	Уязвимость	Возможность угрозы	Риск
E_1	0,82	0,67	0,74	0,40
E_2	0,76	0,25	0,83	0,15
E_3	0,97	0,79	0,15	0,11
E_4	0,94	0,79	0,84	0,62
E_5	0,82	0,98	0,95	0,76

Из приведенной выше таблицы видно, что граничный сервер имеет более высокий риск, чем другие граничные серверы, и порядок граничных серверов на основе значений риска составляет $\langle E_3, E_2, E_1, E_4, E_5 \rangle$, соответственно.

Глобальный граничный сервер периодически вычисляет показатель успешности локальных граничных серверов на основе доступности ресурсов, нагрузки, энергии и уровня риска, который можно вычислить следующим образом:

$$S_r = \frac{\Gamma}{Ra_{E_i}} \times Er_{E_i} \times R_L^t(E_i). \quad (3)$$

При получении запроса на разгрузку глобальный граничный сервер выбирает оптимальный локальный граничный сервер E_{op} с максимальным S_r и минимальным расстоянием от корневого узла в путь доступных локальных ребер. Здесь расстояние является одним из важных параметров, который учитывается для снижения энергопотребления как узла RPL, так и граничного узла. Поскольку узел с меньшим расстоянием будет использоваться для снижения потребления энергии. Рассматривается динамическая природа вычисления задачи, и разгрузка задач между граничными серверами также выполняется путем вычисления целевого граничного сервера. Эти входные параметры учитываются в мягком алгоритме «Актор-Критик» (SAC), который поддерживает выбор граничного узла. Выбор оптимального локального граничного сервера рассматривается как марковский процесс принятия решений с функцией состояния (S), действия (A) и вознаграждения (γ_f), как показано в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6. ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ SAC

Функция	Описание
состояния (S)	Вычисление S_r , ($D_{N,E}$)
действия (A)	Выполнение разгрузки задач
вознаграждения (γ_f)	Снижение потребления энергии при разгрузке

Политика процесса выбора граничного узла обозначается как $\pi_\phi(S_t, A_t)$. Функция значения состояния и мягкая функция Q процесса обозначаются как, соответственно, $Q_\theta(S_t, A_t)$, $V_\psi(S_t)$. Обучение функции значения можно сформулировать как

$$H_v(\psi) = E_{S_t \sim D} \left[\frac{1}{2} \left(V_\psi(S_t) - E_{\Omega_t \sim \pi_\phi} [Q_\theta(S_t, A_t) - \log \pi_\phi(A_t | S_t)] \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Аналогично выполняется обучение мягкой функции Q, которую можно сформулировать в виде:

$$\hat{V}_\theta H_Q(\theta) = \nabla_\theta Q_\theta(A_t, S_t) (Q_\theta(S_t, A_t) - \gamma_f(S_t, A_t) - \delta V_\psi(S_{t+1})). \quad (5)$$

Вычисление вышеуказанных функций способствует достижению оптимальной политики достижения безопасной и энергоэффективной разгрузки. Ниже приведен псевдокод 1 для выбора оптимального граничного сервера на основе SAC для целей разгрузки,

Псевдокод 1: Безопасная разгрузка с учетом рисков

Begin

Initialize $Q(S, A)$, $S = (s_1, s_2, \dots)$, $A = (a_1, a_2, \dots)$

While $off_{req} = 1$ do // offloading between root node and edge

Choose a from A

Compute S_r and select set of best edge servers

```

Compute  $D_{N,E}$ 
Get ( $E_{op}$ )
Offload Tasks ( $\tau_i$ )  $\rightarrow E_{op}$ 
Compute  $\gamma_f(S_t, A_t)$ 
Update  $H_v(\psi)$ ,  $\hat{V}_\theta H_Q(\theta)$ 
End while
For all  $E_i \in E$ 
    Monitor  $Er_{E_i}$ ,  $\Gamma$ 
    Choose  $a$  from  $A$ 
    If ( $a = offload$ ) then // offloading between edge servers
        Compute  $S_r$ 
        Get ( $E_{op}$ )
        Offload  $E_i \rightarrow E_{op}$ 
        Compute  $\gamma_f(S_t, A_t)$ 
        Update  $H_v(\psi)$ ,  $\hat{V}_\theta H_Q(\theta)$ 
    End if
End for
End

```

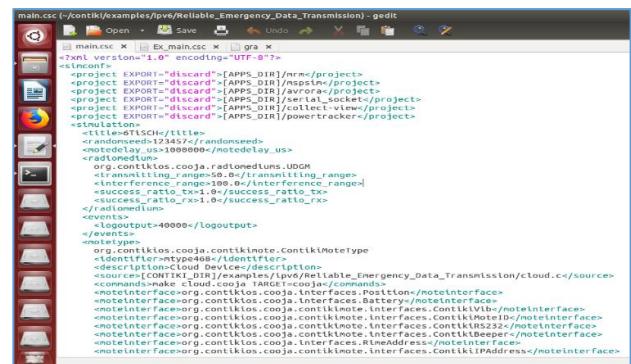
Граничный слой вычисляет все данные, сгенерированные промышленными узлами. Только обычные данные, имеющие большой размер, выгружаются на облачный слой из-за ограниченности ресурсов граничных серверов. Кроме того, облачные серверы используются для хранения огромного количества промышленных данных, которые извлекаются конечными пользователями. Таким образом, предлагаемый подход обладает повышенной масштабируемостью и способен обрабатывать огромные объемы данных с минимальным потреблением энергии и задержкой, тем самым достигая цели.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

A. Настройка симуляции

Предложенный подход Edge-LoRaWAN был смоделирован в симуляторе Союза в операционной системе Contiki 3 с для обеспечения моделирования узлов LoRaWAN в реальном времени.

На рис. 2 изображена симуляция предлагаемого подхода, в котором рис. 2,а иллюстрирует основной файл симуляции, который предоставляет информацию о каталогах, используемых в процессе симуляции. Рис. 2,б изображает радиомодель и другие расширенные настройки, используемые для симуляции. Рис. 2,с представляет начальный экран симуляции, на котором инициализируются узлы. Рис. 2,д изображает аутентификацию узлов доверенным органом.



а

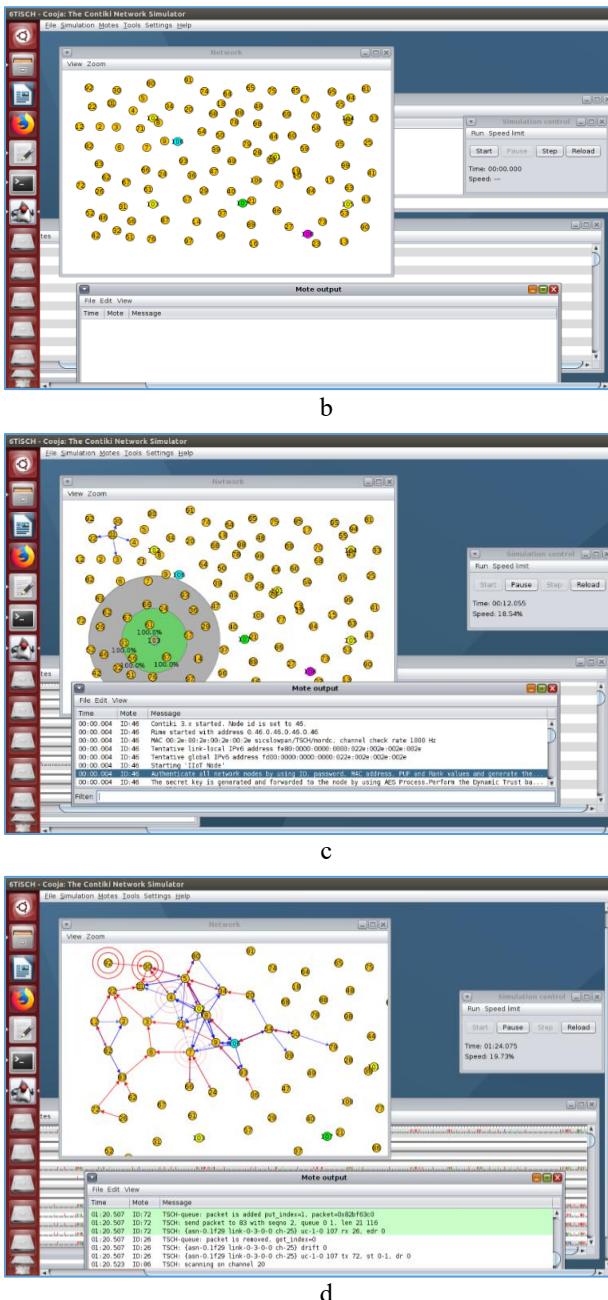


Рис. 2. (а) основной файл моделирования, (б) настройки моделирования, (с) инициализация узлов, (д) аутентификация узлов

B) Сравнительный анализ

На граничном уровне выполняется разгрузка задач, которая в значительной степени управляема глобальными граничными серверами и локальными граничными серверами. Рассматриваются два способа разгрузки, такие как разгрузка с корневых на граничные серверы и разгрузка между граничными серверами с учетом таких метрик, как нагрузка, энергия, доступность, расстояние и уровень риска, с помощью одного алгоритма DRL. Учитывая вышеуказанные метрики во время разгрузки, потребление энергии и задержка предлагаемой работы снижаются, что приводит к повышению общей производительности во всех аспектах.

a) Сравнение потребления энергии

Рис. 3 представляет результаты сравнения потребления энергии в граничном слое с предлагаемыми и существующими подходами. Потребление энергии вызвано неэффективной разгрузкой на граничном уровне, где задачи подделываются хакерами, что приводит к высоким потерям энергии. В этом подходе потребление энергии снижается путем рассмотрения разгрузки двумя способами в терминах корня к краю и между краями с учетом расширенных параметров с использованием алгоритмов DRL.

Предлагаемый подход при увеличении времени моделирования (100 с) достигает потребления энергии в 107 Дж, что меньше, чем в более ранних работах: EERA – 150 Дж, REA-LoRaWAN – 138 Дж, Tri-Layer LoRaWAN – 124 Дж, соответственно. Среднее потребление энергии, достигнутое edge-LoRaWAN, составляет 82,6 Дж, в сравнении с EERA (117,4 Дж), REA-LoRaWAN (107,4) и Tri-Layer LoRaWAN (96,2 Дж), то есть на 13,6-34,8 Дж меньше, чем в существующих подходах.

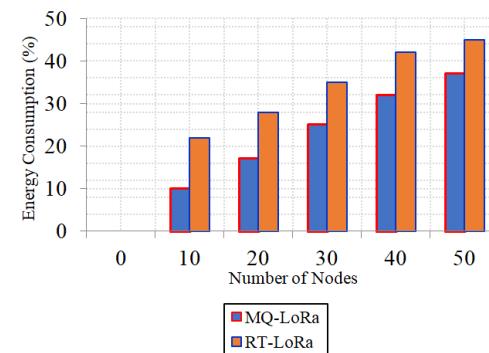


Рис. 3. Количество узлов и потребление энергии (в %)

б) Сравнение задержек

Рис. 4 представляет сравнение задержки в граничном слое с предлагаемыми и существующими подходами. Высокая задержка вызвана неправильной выгрузкой задач на сервер Edger, что приводит к задержке и увеличивает задержку.

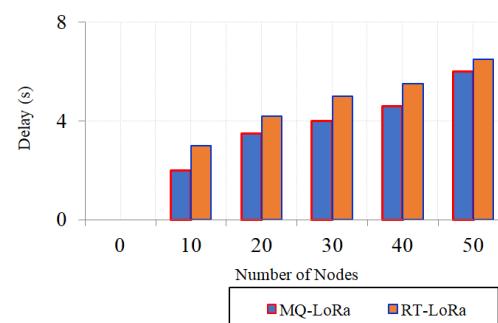


Рис. 4. Количество узлов и задержка (в секундах)

В данном подходе для уменьшения задержки в подходе с двусторонней разгрузкой, который разгружает от корневого узла к глобальному граничному, вредоносные узлы уже отбрасываются на уровень LoRaWAN и фор-

мируют глобальную форму граничных серверов, где граничный сервер подвергается компрометации, для чего используется алгоритм DRL для идентификации скомпрометированных граничных серверов, а затем нежелательная разгрузка на скомпрометированный граничный сервер сокращается, что снижает предлагаемую задержку работы. Предлагаемый подход при увеличении времени моделирования (100 с) достигает низкой задержки в 30 мс, что меньше, чем в более ранних работах: EERA – 103 мс, REA-LoRaWAN и трехслойный LoRaWAN – 70 мс, соответственно. Средняя задержка, достигнутая при использовании подхода Edge-LoRaWAN, составляет 18,8 мс, в сравнении с EERA (60,8 мс), REA-LoRaWAN (52,2 мс) и Tri-Layer LoRaWAN (39,2 мс), то есть на 20,4-40 мс меньше, чем в существующих подходах.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен подход к эффективной и безопасной двусторонней разгрузке вычислений, а именно разгрузка от корня к краю и разгрузка от края к краю. Для учета риска используется мягкий алгоритм «Актор-Критик». Производительность предлагаемого подхода экспериментально подтверждена в симуляторе Сооя, который показал низкое потребление энергии, низкую задержку, высокую пропускную способность, высокий коэффициент доставки пакетов и общую высокую эффективность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование поддержано грантом программы постдоков Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, проект № ПД/22-01КТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Al-Fuqaha A. et al.* Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, No. 4. – P. 2347-2376.
2. *Silva B.N. et al.* Internet of Things: A Comprehensive Review of Enabling Technologies, Architecture and Challenges // IETE Technical Review. – 2017. – Vol. 35, No. 2. – P. 205-220.
3. *Link Labs.* A Comprehensive Look at Low Power, Wide Area Networks [Электронный текст]. – <http://cdn2.hubspot.net/hubfs/427771/lpwanbrochure-interactive.pdf> (дата обращения: 06.08.2024).
4. *Mekki K. et al.* A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-scale IoT Deployment // ICT Express. – 2018. – P. 2405-9595.
5. Nokia, “LTE Evolution for IoT Connectivity,” [Электронный текст]. – <https://tools.ext.nokia.com/asset/200178> (дата обращения: 06.08.2024).
6. *Yousuf A.M., Rochester E., and Ghaderi M.* A Low-Cost LoRaWAN Testbed for IoT: Implementation and Measurements // In Proc. IEEE 4th World Forum in Internet of Things. – 2018.
7. Lora Alliance [Электронный текст]. – <https://www.loraalliance.org> (дата обращения: 06.08.2024).
8. Sigfox [Электронный текст]. – <https://www.sigfox.com> (дата обращения: 06.08.2024).
9. Ingenu RPMA [Электронный текст]. – <https://www.ingenu.com/technology/rpma> (дата обращения: 06.08.2024).
10. Telensa [Электронный текст]: <http://www.telensa.com> (дата обращения: 06.08.2024).
11. Weightless [Электронный текст]: <http://www.weightless.org> (дата обращения: 06.08.2024).
12. Nokia, “LTE M2M-Optimizing LTE for the Internet of Things,” Accessed: December, 2018. [Электронный текст]: <https://novotech.com/docs/default-source/default-documentlibrary/lte-m-optimizing-lte-for-the-internet-of-things.pdf> (дата обращения: 06.08.2024).
13. *Andreev S. et al.* Understanding the IoT Connectivity Landscape: A Contemporary M2M Radio Technology Roadmap // In Proc. IEEE Com. Mag. – 2015. – Vol. 53, No. 9.
14. Kotahinet [Электронный текст]. – <https://kotahi.net/> (дата обращения: 06.08.2024).
15. *Haartsen J.C.* Bluetooth Radio System // In Wiley Encyclopedia of Telecommunications. – John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2003.
16. *Raza U. et al.* Low Power Wide Area Networks: An Overview // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, No. 2.

Построение системы поиска и распознавания объектов на изображениях для устройств с ограниченным вычислительным ресурсом

Ковалев Владислав Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vlad.kovalev94@mail.ru

Сергеев Николай Евгеньевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
nesergeev@sfedu.ru

Аннотация. Одной из востребованных задач бортовых систем обработки и анализа видеопоследовательности является поиск и распознавание объектов на изображениях. Такие системы задают высокие требования к точности поиска и распознавания объектов на изображениях и скорости обработки данных, чтобы своевременно и безошибочно принимать решения во избежание аварийных ситуаций. Чтобы достичь высокой точности поиска и распознавания бортовые системы должны быть оснащены передовыми технологиями, которыми в данный момент являются интеллектуальные алгоритмы цифровой обработки изображений. К числу передовых интеллектуальных алгоритмов относятся свёрточные нейронные сети из-за высоких показателей в точности поиска и распознавания объектов на изображениях.

Как правило, распознающие системы располагаются на автономных носителях, которые имеют ограниченный энергетический потенциал. Скорость обработки данных свёрточными нейронными сетями напрямую зависит от потребляемой мощности вычислительного устройства, на котором построен алгоритм, поэтому выбор вычислительного устройства в первую очередь зависит от потребляемой мощности. Кроме того, вычислительные устройства должны быть оснащены нейронным ускорителем на аппаратном уровне.

Таким образом, распознающие системы должны обеспечивать необходимые показатели точности поиска и распознавания объектов на изображениях, времени обработки данных. При этом вычислительное устройство, на котором реализован алгоритм, ограничено в потребляемой мощности, как следствие устройство имеет ограниченный вычислительный ресурс. Чтобы решить данную задачу необходимо построить аппаратно-программный комплекс с интеллектуальной поддержкой [1, 2].

В работе предложен алгоритм выбора вычислительного устройства для построения свёрточных нейронных сетей на основе многокритериального выбора. Алгоритм формирует набор, состоящий из устройства с ограниченным вычислительным ресурсом, архитектуры свёрточной нейронной сети и точности вычислений. С помощью понятного и определенного порядка действий над компонентами набора можно построить систему поиска и распознавания объектов на изображениях, которая обеспечивает необходимые показатели в точности поиска и распознавания объектов на изображениях, времени обработки данных и потребляемой мощности вычислительного устройства.

В экспериментальной части работы произведена апробация разработанного алгоритма построения системы поиска и распознавания объектов на изображениях для устройств с ограниченным вычислительным ресурсом. В рамках эксперимента определены требуемые входные параметры (критерии): время выполнения алгоритма не более 60 мс, точность поиска и распознавания не менее 80 % Mean Average Precision, потребляемая мощность вычислительного устройства не более 30 Вт. Сформировано множество вычислительных устройств с аппаратной поддержкой нейронного ускорителя: NVIDIA Jetson Nano B01, NVIDIA Jetson TX2 (8GB), NVIDIA Jetson AGX Xavier, Rockchip RK3588. Сформировано множество одноэтапных архитектур свёрточных нейронных сетей с различной вычислительной сложностью: YOLOv3-Tiny, YOLOv5s, YOLOv5l, YOLOv8s. Сформированы условно-реальные изображения с аннотациями на основе среды разработка 3D графики Unreal Engine 5. На основе сформированного датасета получены тренировочная, тестовая и калибровочная выборки. Согласно разработанному алгоритму сформированы наборы, удовлетворяющие заданным критериям. После чего методом взвешенной суммы неоднородным нормированных критериев выбран лучший набор, состоящий из вычислительного устройства NVIDIA Jetson AGX Xavier, программных компонент на основе фрейворка TensorRT, архитектуры свёрточной нейронной сети YOLOv5l и точностью вычислений Integer 8.

Abstract. One of the popular tasks of onboard systems for processing and analyzing video sequences is searching for and recognizing objects in images. Such systems set high requirements for the accuracy of searching and recognizing objects in images and the speed of data processing in order to make timely and error-free decisions to avoid emergency situations. To achieve high accuracy of searching and recognizing, onboard systems must be equipped with advanced technologies, which at the moment are intelligent algorithms for digital image processing. Advanced intelligent algorithms include convolutional neural networks due to their high rates of accuracy in searching and recognizing objects in images.

As a rule, recognition systems are located on autonomous media that have limited energy potential. The speed of data processing by convolutional neural networks directly depends on the power consumption of the computing device on which the algorithm is built, so the choice of a computing device primarily depends on the power consumption. In addition, computing devices must be equipped with a neural accelerator at the hardware level.

Thus, recognition systems must provide the necessary indicators of accuracy in searching and recognizing objects in images, and data processing time. In this case, the computing device on which the algorithm is implemented is limited in power consumption, as a result, the device has a limited computing resource. To solve this problem, it is necessary to build a hardware and software complex with intelligent support [1, 2].

The paper proposes an algorithm for selecting a computing device for building convolutional neural networks based on multi-criteria selection. The algorithm forms a set consisting of a device with a limited computing resource, a convolutional neural network architecture, and computational accuracy. Using a clear and specific order of actions on the components of the set, it is possible to build a system for searching and recognizing objects in images that provides the necessary indicators in the accuracy of searching and recognizing objects in images, data processing time, and the power consumption of the computing device.

In the experimental part of the work, the developed algorithm for building a system for searching and recognizing objects in images for devices with a limited computing resource was tested. Within the framework of the experiment, the required input parameters (criteria) were defined: the algorithm execution time is no more than 60 ms, the search and recognition accuracy is not less than 80% Mean Average Precision, the power consumption of the computing device is not more than 30 W. Many computing devices with hardware support for a neural accelerator were formed: NVIDIA Jetson Nano B01, NVIDIA Jetson TX2 (8GB), NVIDIA Jetson AGX Xavier, Rockchip RK3588. Many single-stage architectures of convolutional neural networks with different computational complexity were formed: YOLOv3-Tiny, YOLOv5s, YOLOv5l, YOLOv8s. Conditionally real images with annotations were formed based on the Unreal Engine 5 3D graphics development environment. Based on the formed dataset, training, test and calibration samples were obtained. According to the developed algorithm, sets satisfying the specified criteria were formed. After that, the best set was selected using the weighted sum of non-uniform normalized criteria method, consisting of the NVIDIA Jetson AGX Xavier computing device, software components based on the TensorRT framework, the YOLOv5l convolutional neural network architecture, and the Integer 8 computational accuracy.

Ключевые слова: свёрточные нейронные сети, вычислительные устройства, распознавание образов.

Keywords: convolutional neural networks, computing devices, pattern recognition.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из широко распространенных направлений при разработке систем обработки и анализа видеопоследовательности является поиск и распознавание объектов на изображениях [3]. Задача поиска и распознавания объектов на изображениях заключается в определении потенциальной локальной области на изображении, где может располагаться целевой объект и последующим отнесением объекта к классу из числа возможных (классификация).

Поиск и распознавание объектов на изображениях осуществляется алгоритмами технического зрения, которые условно можно разделить на классические методы [4, 5] и методы глубокого обучения.

Классические подходы задачу поиска и распознавания решают в два этапа: извлечение областей на изображении, например, скользящими окнами различного разрешения с последующей классификацией. Задача классификации классическими подходами основана на построения усиленных решающих правил в виде линейных комбинаций слабых решающих правил. Алгоритмы классификации классических подходов опираются на выбранный разработчиком набор признаков. Выделение набора признаков, описывающих объекты, как правило, основано на дескрипторах особых точек изображения: углы, границы и др. Формирование набора признаков является главным фактором, влияющим на качество классификации. Поэтому, выбор набора признаков является главной задачей при построении алгоритмов.

С годами стали появляться новые электронно-вычислительные машины способные обрабатывать большие объёмы данных за приемлемый временной интервал. А также стали появляться большие массивы датасетов для задачи поиска и распознавания. Это послужило развитию методов глубокого обучения. В 2012 году появилась первая свёрточная нейронная сеть (СНС), которая достигла лучших результатов в задаче классификации на широкомасштабном датасете ImageNet [6]. С тех пор СНС применяют в решении задач технического зрения [7].

СНС в задаче поиска и распознавания объектов на изображениях условно можно разделить на двухэтапные [8–10] и одноэтапные [11, 12] подходы. Двухэтапные СНС выполняют свою задачу в два этапа: определяют локальные области на изображении, а на втором классифицируют. Двухэтапные СНС достигают лучших показателей в точности поиска и распознавания, однако, имеют большую вычислительную сложность, что увеличивает время выполнения. Одноэтапные СНС производят поиск и распознавание за один этап, что приводит к меньшей точности поиска и распознавания по сравнению с двухэтапными подходами, но обладают меньше вычислительной сложностью, что позволяет строить модели СНС в масштабе реального времени на устройствах с ограниченным вычислительными ресурсом. Таким образом, чтобы обеспечить своевременное принятие решения с высокой точностью, в бортовых системах применяются одноэтапные СНС.

Поскольку распознающие системы располагаются на автономных носителях, которые имеют ограниченный энергетический потенциал [13], то для обработки данных выбирают встраиваемые вычислительные устройства с меньшей потребляемой мощностью. Потребляемая мощность вычислительного устройства напрямую влияет на скорость обработки данных.

Исходя из вышесказанного, распознающая система должна удовлетворять требуемой точности поиска и распознавания объектов на изображении, скорости обработки данных, потребляемой мощности вычислительного устройства.

II. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОИСКА И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ДЛЯ УСТРОЙСТВ С ОГРАНИЧЕННЫМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ РЕСУРСОМ

Системы обработки и анализа видеопоследовательности используют алгоритмы цифровой обработки изображений на базе СНС, которые выполняются на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Потребляемая мощность вычислительного устройства, масштаб времени выполнения алгоритма и точность поиска и распознавания определяет спектр применимых архитектур СНС. Потребляемая мощность вычислительного устройства напрямую влияет на вычислительную мощность устройства и как следствие на скорость обработки данных. С другой стороны, для обеспечения высоких показателей в точности поиска и распознавания требуются вычислительно сложные архитектуры СНС. Таким образом, необходимо сформировать набор, состоящий из компонентов обеспечивающих компромисс между этими показателями.

Одной из значимых инноваций в области разработки устройств с ограниченным вычислительным ресурсом является оснащение на аппаратном уровне специальными дополнительными сопроцессорами, которые позволяют ускорить обработку данных алгоритмов с интеллектуальной поддержкой. Такие аппаратные вычислители получили название нейроускорители. К числу аппаратных сопроцессоров, которые могут выполнять функцию нейроускорителя относятся: Graphics Processing Unit (GPU), Neural Processing Unit (NPU), Tensor Processing Unit (TPU), Field Programmable Gate Array (FPGA) и др. В большинстве случаев нейроускорители поддерживают режимы обработки данных нескольких типов точности Floating Point 32 bit (FP32), половинная точность Floating Point 16 bit (FP16), целочисленная точность Integer 8 (INT8). Переход к обработке данных с пониженной точностью позволяет ускорить выполнение алгоритма, однако, это приводит к снижению точности поиска и распознавания объектов на изображениях [14, 15].

Таким образом, чтобы обеспечить необходимые показатели распознающей системы нужно найти компромисс между вычислительной сложностью алгоритма, точностью поиска и распознавания объектов на изображении, потребляемой мощностью вычислительного устройства. Учитывая вышеизложенное, предложен алгоритм выбора вычислительного устройства для построения СНС, который рассмотрен далее.

Алгоритм построения системы поиска и распознавания объектов на изображениях для устройств с ограниченным вычислительным ресурсом отображен в виде структурной схемы, приведенной на рис. 1. Комментарии к структурной схеме выполнения алгоритма:

1. Формирование исходного состава компонент:

1.a *Определение входных параметров.* На этом этапе задаются входные параметры: время выполнения алгоритма, точность поиска и распознавания алгоритма, потребляемая мощность вычислительного устройства. Все требования задаются исключительно из целевой задачи.

1.b. *Формирование множества вычислительных устройств.* На этом этапе происходит формирование множества вычислительных устройств, на основе опре-

деленных требований: максимальная потребляемая мощность вычислительного устройства, наличие аппаратно-программной поддержки нейроускорителя и др.

1.c. *Формирование множества архитектур СНС.* На этом этапе происходит формирование множества одноэтапных архитектур СНС. Критериями выбора архитектур СНС является вычислительная сложность, точность поиска и распознавания объектов на изображения на известных бенчмарках, поддержка выполнения определенных операций архитектур СНС вычислительными устройствами.

1.d. *Формирование данных.* На этом этапе происходит формирование тренировочного, тестового и калибровочного датасетов.

2. *Формирование набора.* На этом этапе происходит выбор вычислительного устройства из сформированного множества с соответствующими программными средствами позволяющими строить модели СНС.

2.a. *Выбор архитектуры СНС.* На этом этапе происходит выбор архитектуры СНС из сформированного множества. Если рассмотрены все архитектуры, происходит переход к шагу 2.

2.b. *Обучение модели СНС.* На этом этапе происходит обучение выбранной модели СНС на тренировочном датасете.

2.c. *Выбор разрядности вычислений.* На этом этапе происходит выбор типа точности обработки данных из числа поддерживаемых типов выбранного вычислительного устройства. Если рассмотрено всё множество разрядностей вычислений для данного устройства, то происходит переход к шагу 2.a.

2.d. *Построение модели СНС на вычислительном устройстве.* На этом этапе происходит построение выбранной модели СНС на вычислительном устройстве с помощью программных компонент. Для построения модели СНС с целочисленной точностью вычислений необходимо произвести калибровку модели СНС с помощью квантования весовых коэффициентов.

Существуют два метода квантования post-training quantization (PTQ) и quantization-aware training (QAT). Метода PTQ производится после обучения модели СНС. Метод PTQ чаще используется, потому что есть доступ к весовым коэффициентам во всех слоях модели СНС. На основе калибровочного датасета собирается статистика распределения на выходах скрытых слоев СНС, после чего формируются масштабирующие коэффициенты, которые используются для квантования весовых коэффициентов. Этот процесс называется калибровкой модели.

Если метод PTQ приводит к значительным потерям точности поиска и распознавания объектов на изображении СНС, то применяют метод QAT, который может повысить точность поиска и распознавания. Метод QAT производит квантование модели СНС в процессе обучения, что позволяет сократить потери в точности поиска и распознавания. Если построить модель на данном вычислительном устройстве не представляется возможным, то происходит переход к шагу 2.a.

2.e. Оценка времени выполнения СНС. На этом этапе происходит оценка времени выполнения алгоритма на вычислительном устройстве. В случае неудовлетворительного времени обработки данных моделью СНС происходит переход к шагу 2.c.

2.f. Оценка точности поиска и распознавания СНС. На этом этапе происходит оценка точности поиска и распознавания объектов на изображениях с помощью интегрального показателя качества Mean Average Precision (mAP) [16, 17]. В случае неудовлетворительной точности поиска и распознавания модели СНС происходит переход к шагу 2.a.

2.g. Буферизация оценок критериев набора. На этом этапе происходит буферизация удовлетворяющих требованиям оценок критериев набора.

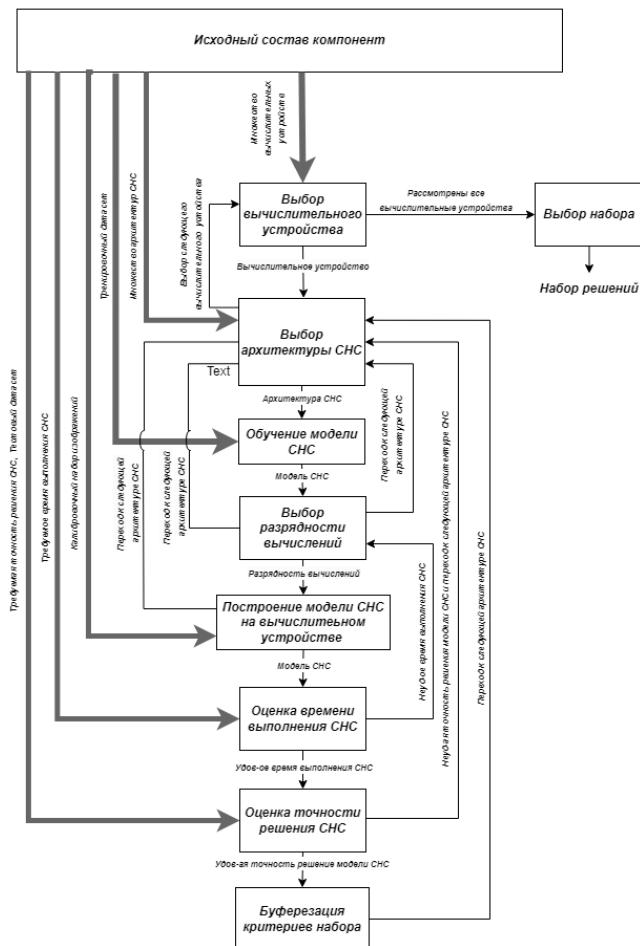


Рис. 1. Структурная схема алгоритма построения системы поиска и распознавания объектов для устройств с ограниченным вычислительным ресурсом

3. Выбор набора. Для всех удовлетворяющих наборов происходит выбор лучшего на основе метода взвешенной суммы неоднородных нормированных критериев [18]:

$$F(\hat{f}|\omega) = \omega_0 \hat{f}_0 + \dots + \omega_m \hat{f}_m, \quad (1)$$

где ω – весовые коэффициенты (коэффициенты важности) критерия, \hat{f} – нормированные значения неоднородных критериев. Каждому критерию необходимо выставить свой коэффициент важности, сумма которых равна 1. Нормализация критериев осуществляется:

$$\hat{f}_i = \frac{f_i}{f_{i*}}, \quad (2)$$

где f_{i*} – наибольшее значение критерия. Таким образом, значения нормированных критериев находятся в диапазоне от 0 до 1.

На основе формулы (1) для всех наборов рассчитываются, обобщенные показатели значимости и выбирается набор с наибольшим значением показателя.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА

В данном разделе научной работы описана апробация разработанного алгоритма построения системы поиска и распознавания объектов на изображениях для устройств с ограниченным вычислительным ресурсом.

1. Формирование исходного состава компонент

1.a Определение входных параметров. Допустим, что точность поиска и распознавания должна быть не менее 80 % интегрального показателя качества поиска и распознавания mAP, время выполнения не более 60 мс, потребляемая мощность вычислительного устройства не более 30 Вт. множество вычислительных устройств с аппаратной поддержкой нейронного ускорителя.

1.b. Формирование множества вычислительных устройств. На основе имеющихся в наличии аппаратных вычислителей сформировано множество вычислительных устройств с поддержкой аппаратного ускорителя типа GPU и NPU, а также потребляемая мощность устройств не превышает 30 Вт (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Вычислительные устройства

Вычислительное устройство	Потребляемая мощность, Вт	Тип нейроускорителя
NVIDIA Jetson Nano B01	10	GPU
Rockchip RK3588	12	NPU
NVIDIA Jetson TX2 (8GB)	15	GPU
NVIDIA Jetson AGX Xavier	30	GPU

1.c. Формирование множества архитектур СНС. Сформировано множество одноэтапных архитектур СНС типа You Only Look Once (YOLO) [19 – 21] (табл. 2) с различной вычислительной сложностью. Вычислительная сложность модели СНС измеряется в количестве операций с плавающей точкой в секунду или floating-point operations per second (FLOPS).

ТАБЛИЦА 2. Архитектуры СНС

Архитектура	Разрешение изображения, пикс	Вычислительная сложность, $10^9 \cdot \text{FLOPS}$
YOLOv3-Tiny	960 x 960	19
YOLOv5s	960 x 960	24.1
YOLOv5l	960 x 960	135.3
YOLOv8s	960 x 960	28.7

1.d. Формирование данных. С помощью средств виртуального моделирования 3D графики Unreal Engine 5 произведено формирование аннотированного датасета условно-реальных изображений, который состоит из 5 классов техники. Датасет сформирован из 80 видео сюжетов различной местности видимого оптического диапазона. Из первых 50 сюжетов получена тренировочная выборка, а из остальных 30 тестовая выборка. В тренировочную выборку входят 50000, а в тестовую 30000 аннотированных

изображений. На рис. 2 приведены два синтетических изображения из обучающей выборки, на которых расположен целевой объект класса «автомобиль». Для калибровки модели используется тестовый датасет.



Рис. 2. Условно-реальные изображения. Красным цветом выделен прямоугольник, обрамляющий объект интереса на изображении

2. *Формирование набора.* На основе сформированного состава компонент происходит построение моделей СНС на вычислительных устройствах. Для построения СНС на вычислительных устройствах с GPU используется фреймворк оптимизированного вывода TensorRT, а для вычислительного устройства с NPU фреймворк RKNN Toolkit 2. Производится оценка точности поиска и распознавания объектов на изображениях и время выполнения. Наборы, удовлетворяющие пороговым значениям критериев, буферизуются.

В табл. 3 приведены все проанализированные комбинации наборов, где f_1 отвечает за потребляемую мощность, f_2 – время выполнения, f_3 – точность поиска и распознавания. Зачёркнутые оценочные значения означают, что данный набор не удовлетворяет пороговому значению критериев. Удовлетворили все критерии два набора:

1) аппаратно-программной составляющей вычислительного устройства NVIDIA Jetson AGX Xavier и фреймворка TensorRT, архитектуры YOLOv5l, типа точности обработки данных FP16 и датасетов;

2) аппаратно-программной составляющей вычислительного устройства NVIDIA Jetson AGX Xavier и фреймворка TensorRT, архитектуры YOLOv5l, типа точности обработки данных INT8 и датасетов.

3. *Выбор набора.* Произведена нормировка полученных критериев по формуле (2). Каждому критерию назначен свой коэффициент важности $\omega_1 = 0.4$, $\omega_2 = 0.4$, $\omega_3 = 0.2$. С помощью формулы (1) для буферизированных наборов оценён обобщенный показатель значимости F . Наибольшее значение набрал набор, состоящий из вычислительного устройства NVIDIA Jetson AGX Xavier, архитектуры YOLOv5l, точность вычислений INT8.

ТАБЛИЦА 3. ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ СФОРМИРОВАННЫХ НАБОРОВ

Вычислительное устройство	Архитектура СНС	Точность вычислений	f_1 , Вт	f_2 , мс	f_3 , %	\hat{f}_1	\hat{f}_2	\hat{f}_3	$F(\hat{f} \omega)$
NVIDIA Jetson Nano B01	YOLOv3-Tiny	FP32	10	164	-	-	-	-	-
		FP16	10	110	-	-	-	-	-
	YOLOv5s	FP32	10	324	-	-	-	-	-
		FP16	10	196	-	-	-	-	-
	YOLOv5l	FP32	10			Недостаточный объём памяти			
		FP16	10			Недостаточный объём памяти			
	YOLOv8s	FP32	10	357	-	-	-	-	-
		FP16	10	220	-	-	-	-	-
	NVIDIA Jetson TX2 (8GB)	YOLOv3-Tiny	15	75	66,79	-	-	-	-
		FP16	15	40	-	-	-	-	-
		YOLOv5s	15	124	-	-	-	-	-
		FP16	15	72	-	-	-	-	-
		YOLOv5l	15	512	-	-	-	-	-
		FP16	15	290	-	-	-	-	-
		YOLOv8s	15	140	-	-	-	-	-
		FP16	15	84	-	-	-	-	-
	NVIDIA Jetson TAGX Xavier	YOLOv3-Tiny	30	27	66,67	-	-	-	-
		FP16	30	10	66,79	-	-	-	-
		INT8	30	7,4	49,73	-	-	-	-
		YOLOv5s	30	51	73,29	-	-	-	-
		FP16	30	22	73,29	-	-	-	-
		INT8	30	13	54,15	-	-	-	-
		YOLOv5l	30	194	-	-	-	-	-
		FP16	30	58	86,77	1	0,55	1	0,82
		INT8	30	32	80,3	1	1	0,84	0,94
	Rockchip RK3588	YOLOv8s	30	47	73,27	-	-	-	-
		FP16	30	16,8	73,33	-	-	-	-
		INT8	30	11,7	65	-	-	-	-
		YOLOv3-Tiny	12	60	66,67	-	-	-	-
		FP16	12	30	60	-	-	-	-
	YOLOv5s	FP32	12	120	-	-	-	-	-
		FP16	12	60	70	-	-	-	-
	YOLOv5l	FP32	12	450	-	-	-	-	-
		FP16	12	230	-	-	-	-	-
	YOLOv8s	FP32	12	140	-	-	-	-	-
		FP16	12	70	-	-	-	-	-

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные бортовые системы обработки и анализа видеопоследовательности задают высокие требования к характеристикам алгоритмов точности поиска и распознавания объектов на изображениях и быстродействия, чтобы обеспечить точное и своевременное принятие решения.

Высокие показатели поиска и распознавания могут быть достигнуты современными алгоритмами на базе свёрточных нейронных сетей. Однако, потребляемая мощность устройств, на которых построены свёрточные нейронные сети, ограничена потому что, бортовые системы анализа последовательности видеоизображений располагаются на автономных носителях с ограниченным энергетическим потенциалом. Поэтому построение вычислительно сложных свёрточных нейронных сетей, которые могут обеспечить требуемую точность поиска и распознавания в масштабе реального времени на устройствах с ограниченным вычислительным ресурсом является нетривиальной задачей.

В работе предложен алгоритм построения системы поиска и распознавания объектов на изображениях на устройствах с ограниченным вычислительным ресурсом, который формирует набор, состоящий из вычислительного устройства с соответствующими программными компонентами для построения выбранной архитектуры свёрточной нейронной сети с определенным типом данных, в котором производится обработка изображений.

Произведена апробация, разработанного алгоритма путём проведения вычислительного эксперимента. Сформирован исходный состав компонент: входные параметры, множество вычислительных устройств, множество архитектур свёрточных нейронных сетей и данных. На основе исходного состава компонент выбран лучший набор, состоящий из вычислительного устройства NVIDIA Jetson AGX Xavier с соответствующим фреймворком TensorRT, архитектуры YOLOv5l, типа точности обработки данных INT8, тренировочного, тестового и калибровочного датасетов. На основе определенного порядка действий над компонентами набора можно построить систему поиска и распознавания объектов на изображениях для устройств с ограниченным вычислительным ресурсом, которая удовлетворяет требуемым показателям в точности поиска и распознавания объектов на изображениях, времени выполнения алгоритма и потребляемой мощности вычислительного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаскаров Д., Сикулер Д., Фомин В., Фомина И. Интеллектуальные информационные системы: Интеллектуальная информационная технология. Экспертные системы. – СПб.: СПГУВК. – 2004.
2. Павлов С. Системы искусственного интеллекта. – 2011.

3. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. – 1972.
4. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. CVPR 2001. – Ieee, 2001. – Vol. 1. – P. I-I.
5. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection // 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05). – Ieee, 2005. – Vol. 1. – P. 886-893.
6. Russakovsky O., Deng J., Su H. [и др.]. Imagenet large scale visual recognition challenge // International journal of computer vision. – 2015. – Vol. 115. – P. 211-252.
7. Жерон О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем: пер. с англ. – СПб.: ООО "Альфа-книга", 2018.
8. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks // Advances in neural information processing systems. – 2015. – Vol. 28.
9. Dai J., Li Y., He K., Sun J. R-fcn: Object detection via region-based fully convolutional networks // Advances in neural information processing systems. – 2016. – Vol. 29.
10. Pang J., Chen K., Shi J. [и др.]. Libra r-cnn: Towards balanced learning for object detection // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2019. – P. 821-830.
11. Liu W., Anguelov D., Erhan D. [и др.]. Ssd: Single shot multibox detector // Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11–14, 2016, Proceedings, Part I 14. – Springer, 2016. – P. 21-37.
12. Duan K., Bai S., Xie L. [и др.]. Centernet: Keypoint triplets for object detection // Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. – 2019. – P. 6569-6578.
13. Алатов Б., Бабаян П., Балашов О., Степашкин А. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
14. Ковалев В.В., Сергеев Н.Е. Реализация свёрточных нейронных сетей на встраиваемых устройствах с ограниченным вычислительным ресурсом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6 (223). – С. 64-72.
15. Stein E., Liu S., Sun J. Real-time object detection on an edge device (Final Report) // CS230: Deep Learning. – 2019.
16. Everingham M., Van Gool L., Williams C.K. [и др.]. The pascal visual object classes (voc) challenge // International journal of computer vision. – 2010. – Vol. 88. – P. 303-338.
17. Padilla R., Netto S.L., Da Silva E.A. A survey on performance metrics for object-detection algorithms // 2020 international conference on systems, signals and image processing (IWSSIP). – IEEE, 2020. – P. 237-242.
18. Подиновский В., Потапов М. Метод взвешенной суммы критерии в анализе многокритериальных решений: pro et contra // Бизнес-информатика. – 2013. – № 3 (25). – С. 41-48.
19. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: better, faster, stronger // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2017. – P. 7263-7271.
20. Redmon J., Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement // arXiv preprint arXiv:1804.02767. – 2018.
21. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Liao H.-Y.M. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection // arXiv preprint arXiv:2004.10934. – 2020.

Разработка отечественной интеллектуальной геоинформационной системы

Вагизов Марсель Равильевич
Витлев Кирилл Александрович
Челпанов Владислав Сергеевич

Кафедра информационных систем и технологий

Институт леса и природопользования

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический

университет имени С.М. Кирова

Санкт-Петербург, Россия

bars-tatarin@yandex.ru

Аннотация. В условиях импортозамещения особую актуальность приобретает задача создания отечественного программного обеспечения, основной целью которого является визуализация и анализ геопространственных данных. В статье рассматриваются базовые и специализированные функции которыми должна обладать интеллектуальная геоинформационная система. На примере задач лесовосстановления указываются ряд функций требуемых при разработке такой ГИС.

Abstract. In the conditions of import substitution the task of creating domestic software, the main purpose of which is the visualization and analysis of geospatial data, is of particular relevance. The article discusses the basic and specialized functions that should have an intelligent geographic information system. On the example of reforestation tasks a number of functions required in the development of such a GIS are indicated.

Ключевые слова: геоинформационные системы, интеллектуальная обработка данных, лесные экосистемы

Keywords: geoinformation systems, intelligent data processing, forest ecosystems.

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях работы санкционного режима и в связи с оттоком части зарубежных компаний предоставляющих услуги по работе с геопространственными данными необходимо обладать отечественными решениями в области геоинформационных технологий.

Изменение климата в России ведёт к увеличению различных аномальных и нетипичных природных событий на территории страны, что ведёт к значительным экономическим убыткам [1, 2]. Одним из эффективных способов мониторинга земной поверхности и происходящих на ней явлений, традиционно используются геоинформационные системы различного назначения MapInfo, ArcGIS. Визуализация геопроцессов позволяет анализировать природные события различного масштаба и генезиса, что в дальнейшем позволяет обоснованно принимать управленческие решения на базе полученной от геоинформационных систем информации. Однако, стоит отметить,

что большинство программных продуктов данного сектора, использовавшихся том, числе в деятельности государственных органов, являются зарубежными. Такие программные продукты как MapInfo и ArcGIS получили широкое распространение с конца 1990-ых годов и используются и по настоящее время [3, 4].

Несмотря на существующие отечественные программные решения в данной сфере (Гис Integro, ГИС аксиома) они получили ограниченный сектор их использования, заказчиками которых, как правило, являются специализированные и отраслевые компании. Существующие на сегодняшний день открытые программные продукты, такие как QGIS и NEXTGIS являются полезными инструментами при решении ряда задач. И те и другие программные продукты имеют в своём составе ограниченные функции по применению интеллектуальной обработки данных.

На сегодняшний день, требуется такой способ взаимодействия пользователя с системой при котором, большинство трудоёмких функций по обработке и анализу полученной геоинформации остаются за самой системой. К таким методам обработки информации можно отнести обработку информации средствами машинного обучения. В таком случае, систему, оперирующую геопространственными данными и в своём составе преимущественно содержащую функции интеллектуальной обработки данных можно назвать интеллектуальной геоинформационной системой (ИГИС).

II. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проектирования архитектуры интеллектуальной геоинформационной системы, необходимо определить ряд функций которыми она должна обладать, среди наиболее распространённых функций подлежат разработке в первую очередь стандартные картометрические операции:

1. Измерение расстояний в различных единицах измерения.
2. Определение и работа со стандартными наборами картографических форматов данных.

3. Экспорт, импорт файлов.
4. Работа с полигонами.
5. Создание тематических слоёв.
6. Выбор и работа с картографическими проекциями.

Данный список указанных функций не окончен, он показывает только базовые задачи и направления которые должны быть в составе любой геоинформационной системы. Второй набор функций, отличающий интеллектуальную систему от стандартной, включает в себя набор функций, связанных с обработкой сверхбольших объёмов информации. При этом структура и вид такой информации может быть гетерогенна. К наиболее частым задачам в области оперирования и обработки геопространственных данных с элементами интеллектуальной обработки данных можно отнести:

1. Анализ взаимосвязей между пространственными объектами.
2. Обработка изображений и извлечение полезной информации из них.
3. Создание прогнозных моделей.
4. Визуализация графических моделей геопроцессов.
5. Получение систематизированной информации на основе обработки больших объёмов не структурированной информации.

При формировании структуры ИГИС необходимо учитывать, что отраслевые задачи, для которых такая система способна обеспечить полноценный набор необходимых функций может быть доработана на этапе разработке целевой конечной версии системы, однако необходим универсальный многофункциональный каркас ИГИС, её базовая версия. После формирования базовой версии, специальная часть дорабатывается с учётом требований заказчика к системе и определения набора требований. Формируется и база знаний и концептуальная структура наиболее подходящей базы пространственных данных. Выбирается архитектура и инструменты для её проектирования и интеграции в систему.

Для удобства понимания и построения специальной части ИГИС, представим необходимость разработки системы для арендаторов земель лесного фонда, чьи задачи, как правило, связаны с мониторингом и анализом территории покрытой лесом. Определим специальные функции интеллектуальной геоинформационной системы, представленные на рис. 1.

Использование функционала ИГИС предполагает выработку целевых установок, конечная цель которых, является возможность воздействия, на лесную экосистему исходя из анализа геопространственной информации, по выработанному решению. К такому решению может привести модель развития территории, визуализация которой должна быть в составе ИГИС.



Рис. 1. Основные задачи мониторинга лесовосстановительных процессов интегрируемых в ИГИС

Для арендатора земель лесного фонда важно следить за процессами, происходящими на подконтрольной территории, конечно альтернативой натурному обследуанию территории, используется оценка территории посредством анализа данных дистанционного зондирования Земли [5, 6]. В таком случае в составе ИГИС должен быть реализован модуль оценки данных дистанционного зондирования Земли. На начальном этапе уточняются сведения, требуемые для конечного результата заказчика. В качестве одного из таких требований можем предположить необходимость оценки состояния лесовосстановления на территориях подвергшихся вырубке. Исходя из состава компонентов рис. 1 первоначально требуется локализовать участок для обработки и оценки таких сведений рис. 2.



Рис. 2. Вид естественного лесовосстановления по материалам дистанционного зондирования Земли

После выбора территории для анализа, необходимо определить функции, которые будут обработаны специальными алгоритмами, такие алгоритмы указаны в работе авторов [7].

Для анализа лесовосстановления необходимо учитывать качество обрабатываемых материалов, так на снимках полученных средствами спутниковых систем, среднего пространственного разрешения, достаточно сложно точно определить породный состав насаждений, но вполне возможно определить количественные характеристики древостоя. Для уточнения породного состава в состав ГИС можно импортировать данные полученные посредством сбора информации беспилотными летательными аппаратами.

В таком случае, исходя из необходимости определения конкретной характеристики, интеллектуальная геоинформационная система при выводе конечного результата обработки данных должна предоставлять возможность интерпретации полученных результатов. Итоговый вид экранных форм пользователя определяет разрабатываемый интерфейс программы. В данном примере определения характеристик процессов лесовосстановления можно указать следующие необходимые для отображения данные:

1. Количество насаждений по выбранной территории.
2. Общее состояние территории.
3. Данные почвенного состава (по картам).
4. Данные по погибшим насаждениям.
5. Данные по успешности приживаемости лесных культур.

Дизайн такого приложения может быть выполнен с учётом пользовательского опыта (UX/UI) полученного при работе с другими геоинформационными системами и иметь интерактивный вид. Стратегия разработки приложения должна быть ориентирована с упором на серверную обработку информации при централизованном агрегировании. Особое внимание при разработке ИГИС необходимо уделить надёжности и защите данных, а также сформировать комплексный план по тестированию продукта с учётом разрабатываемых специфических задач.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проводимого авторами исследования разработан прототип интеллектуальной геоинформационной системы IGIS [8] свид. № 2023664113. В составе базовой версии системы присутствуют необходимые стандартные картометрические операции, реализована и часть специальных функций. Часть рассматриваемых задач находится в проектной стадии и подлежит разработке коллективом авторов, а также требует поддержки со стороны государственных или частных организаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кичигина Н.В. Наводнения Сибири: географический и статистический анализ за период климатических изменений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 41-60. – DOI: 10.21638/spbu07.2021.103. – EDN MHYGPZ.
2. Сывороткин В.Л. Озоновый слой и погодные аномалии в Северном полушарии в зимне-весенний период 2017-2018 гг // Пространство и Время. – 2018. – № 1-2 (31-32). – С. 232-257. – DOI: 10.24411/2226-7271-2018-11091. – EDN YTGUWT.
3. Булдаков И.В. Конвертация тематических и пользовательских условных обозначений из mapinfo в arcgis // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 2. – С. 13-19. – EDN ZCHVVD.
4. Коллобова К.А., Яковлев В.Н. Анализ рынка недвижимости города Архангельска с помощью геоинформационной системы MapInfo Professional // NovaInfo.Ru. – 2018. – Т. 1, № 89. – С. 30-33. – EDN XYNZTV.
5. Борисов Р.Б., Селиванов А.А., Вагизов М.Р. [и др.]. Анализ усыхания древесной растительности по материалам дистанционного зондирования Земли в Гатчинском лесничестве // Актуальные вопросы лесного хозяйства: Материалы VI международной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2022 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. – СПб.: Общество с ограниченной ответственностью «Реноме», 2022. – С. 203-207. – EDN ZBFVBA.
6. Булгакова А.Г., Вагизов М.Р., Борисов Р.Б., Елисеев Д.И. Анализ вырубок по материалам дистанционного зондирования Земли в Забайкальском крае // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25–27 мая 2022 года. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2022. – С. 76-80. – EDN QMKYEM.
7. Вагизов М.Р., Витлев К.А., Попов А.И. [и др.]. Алгоритм распознавания крон деревьев по снимкам среднего разрешения для управления геоинформационными моделями лесных экосистем // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сборник докладов Четвертой Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 18–22 апреля 2023 года. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 131-134. – EDN QFWUCX.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665369 Российская Федерация. Интеллектуальная геоинформационная система (IGIS): № 2023664113: заявл. 03.07.2023: опубл. 14.07.2023 / М.Р. Вагизов, К.А. Витлев, В.С. Челпанов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова». – EDN XPSLEM.

О восстановлении орбит по переключениям

Миухин Валерий Борисович
 Институт компьютерных технологий
 и информационной безопасности
 Южный федеральный университет
 Таганрог, Россия
 vbmnuhin@sfedu.ru

Аннотация. В работе предлагается новый класс задач восстановления орбит групп, действующих на подмножествах конечного множества. Эти задачи включают, в качестве частного случая, проблему Р. Стенли о возможности восстановления графа по набору графов, получаемых при переключениях его вершин. Для орбит произвольных групп устанавливается ряд условий восстановления; в частности, показывается восстановимость орбит групп нечётного порядка. В зависимости от группы, полученные результаты применимы к таким комбинаторным объектам, как ориентированные графы, гиперграфы, ожерелья, и ряду других. Техника доказательств основана на вычислениях в алгебре орбит.

Abstract. In this paper, we introduce a new reconstruction problem for orbits of a group that acts on subsets of a finite set. The vertex switching reconstruction problem for graphs, considered by R. Stanley in 1985, appears as a partial case. Some conditions for reconstruction are given; in particular, it is stated that all orbits of any group of an odd order are reconstructible. The results are applicable to such combinatorial objects as digraphs, hypergraphs, necklaces, and so on. The technique used is based on evaluations in the orbit algebra.

Ключевые слова: графы, гиперграфы, группы перестановок, орбиты, восстановление, переключения вершин, алгебра орбит.

Keywords: graphs, hypergraphs, permutation groups, orbits, reconstruction, vertex switching, orbit algebra.

I. ВВЕДЕНИЕ

Задачи о возможности полного описания какого-либо объекта на основе свойств его максимальных подобъектов являются традиционными в различных областях математики. В частности, в теории графов подобные задачи называют *проблемами восстановления* [1]. Наиболее известными из них являются поставленная в 1942 году гипотеза Улама-Келли о вершинной восстановимости [2], и гипотеза Харари о рёберной восстановимости [3], сформулированная в 1964 году. Несмотря на значительные усилия, на момент написания данной статьи эти гипотезы остаются недоказанными.

Вместе с тем в ходе исследований было замечено, что в ряде случаев однозначное восстановление комбинаторных объектов, аналогичных графикам, оказывается невозможным. В частности, аналог гипотезы Улама-Келли для ориентированных графов был опровергнут в 1977 году П. Стокмейером [4], указавшим примеры невосстановимых турниров. Затем, в 1987 году, В. Кокей [5, 6] привёл примеры невосстановимых гиперграфов.

В попытках объяснить различия в восстановимости таких, казалось бы, сходных объектов, как графы и орграфы, было предложено [7–9] перенести гипотезы восстановления на так называемые -орбиты, т.е., орбиты групп, действующих на булеване (или на других частичноупорядоченных множествах). Такой подход позволил взглянуть на проблемы восстановления с единых позиций и привёл к получению ряда новых результатов [10].

В 1985 году Р. Стенли [11] сформулировал новую гипотезу о восстановлении графов по переключениям их вершин, также остающуюся в настоящее время открытой. Целью данной работы является изучение аналога конструкции Стенли для -орбит групп перестановок. В частности, доказывается, что все -орбиты групп нечётного порядка восстанавливаются в смысле Стенли.

Работа имеет следующую структуру. Раздел 2 носит справочный характер. В нём напоминаются основные определения и даётся краткий обзор результатов, связанных с задачами восстановления. Раздел 3 посвящён введению понятия -орбит и операций над ними. Здесь же строится алгебра орбит, а в следующем разделе 4 кратко рассматриваются её некоторые частные случаи – алгебры графов и ожерелий. В разделе 5 каждой -орбите произвольной группы сопоставляется гиперграф. Это позволяет перенести на орбиты такие понятия теории графов, как степени вершин, связность, и т.д. В разделе эти гиперграфы используются для переноса на -орбиты проблемы Стенли, и для доказательства ряда утверждений о восстановимости орбит. В заключении предлагаются некоторые возможные направления дальнейших исследований проблем восстановления.

II. ОБЗОР ПРОБЛЕМ ВОСТАНОВЛЕНИЯ

Напомним основные определения. Под *графами* далее будем понимать неориентированные графы без петель и кратных рёбер [12]. Пусть $\Gamma = (V, E)$ – такой граф на множестве $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ вершин и

$$E = \{e_1, \dots, e_m\} \subseteq V^{(2)}$$

рёбер, где $V^{(2)}$ означает множество всех неупорядоченных пар различных вершин. Через Γv_i обозначим подграф, получающийся из Γ удалением вершины $v_i \in V$ вместе со всеми инцидентными ей рёбрами. Сопоставим графу Γ набор $U(\Gamma) = \langle \Gamma v_1, \dots, \Gamma v_n \rangle$ всех его вершинноисключённых подграфов, рассматриваемых с точностью до изоморфизма. (Заметим, что в этом наборе может

быть несколько экземпляров одного и того же графа.) Если для графов Γ и T выполняется равенство $U(\Gamma) = U(T)$, то назовём их *-эквивалентными*. Будем говорить, что граф *вершинно-восстановим*, если он -эквивалентен только самому себе.

Гипотеза 1 (гипотеза Улама-Келли). *Если график имеет более двух вершин, то он вершинно-восстановим.*

Известно, что эта гипотеза справедлива для всех графов с числом вершин, не превышающим 12.

Пусть теперь Γe_i означает подграф, получающийся из Γ удалением ребра $e_i \in E$, причём инцидентные этому ребру вершины не удаляются, (иногда такие подграфы называют *суграфами*). Сопоставим графу Γ набор $H(\Gamma) = \{\Gamma e_1, \dots, \Gamma e_m\}$ и введём понятия – *эквивалентности* и *рёберной восстановимости* точно так же, как это было сделано выше.

Гипотеза 2 (гипотеза Харари). *Если график имеет более трёх рёбер, то он рёберно-восстановим.*

Графы $K_1 \cup K_3$ и $K_{1,3}$ с тремя рёбрами, показанные в средней части рис. 1, являются единственной известной парой – эквивалентных графов.

Гипотезам Улама-Келли и Харари посвящена обширная литература [1, 13–15]. Найдены обширные классы восстановимых графов, например, известно, что все несвязные и все регулярные графы вершинно-восстановимы. Наиболее общие результаты [16, 17] связаны с гипотезой Харари:

Утверждение 1 (Л. Ловас, 1972 г., В. Мюллер, 1977 г.) *Пусть график имеет n вершин и m рёбер. Если для него выполняется либо неравенство Ловаса*

$$4m > n(n - 1), \quad (1)$$

либо неравенство Мюллера

$$2^{m-1} > n!, \quad (2)$$

то такой график рёберно-восстановим. ■

В 1984 году Р. Стенли в работе [11] начал изучение новой проблемы восстановления, которая формулируется следующим образом: рассмотрим график $\Gamma = (V, E)$ на множестве $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ вершин, и для каждой его вершины v_i построим множество

$$E_i = \{\{v_i, v_j\} : j = 1, \dots, n, j \neq i\}.$$

Граф $\Theta_i = (V, E \setminus E_i)$ назовём *переключением* графа Γ по v_i . Другими словами, для построения Θ_i из Γ удаляют все рёбра, инцидентные v_i , но добавляют все рёбра между v_i и несмежными с ней в Γ вершинами. Сопоставив Γ множество $S(\Gamma) = \{\Theta_1, \dots, \Theta_n\}$, определим *-восстановимость* так же, как это уже делалось выше. Соответствующая задача восстановления называется *восстановлением по переключениям* (англ. *switching reconstruction problem*); условимся далее для краткости называть её *S-восстановлением*.

Интерес к проблеме Стенли связан со следующим результатом:

Утверждение 2 (Р. Стенли, 1984 г.) *Если число n вершин графа не делится на четыре, т.е., $n \not\equiv 0 \pmod{4}$, то график – восстановим.* ■

Известен пример пары -эквивалентных графов на четырёх вершинах: как пустой график $4K_1$, так и цикл C_4 , при переключениях их вершин порождают один и тот же набор из четырёх графов $K_{1,3}$.

Гипотеза 3 (гипотеза Стенли). *Все графы с числом вершин $n = 4k \geq 8$ восстановимы по переключениям вершин.*

Известно [18–21], что эта гипотеза справедлива для всех несвязных и для всех регулярных графов с более чем четырьмя вершинами. Тем не менее, в полном объёме она остаётся открытой.

III. АЛГЕБРА k -ОРБИТ ГРУППЫ ПЕРЕСТАНОВОК

Введём понятия, необходимые для обобщения проблемы Стенли на орбиты. Рассмотрим булеван

$$C = 2^W = \{c_i : c_i \subseteq W\}, \quad (i = 1, 2, \dots, 2^n),$$

множества $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ из n элементов, (то есть, совокупность всех подмножеств множества W). Заметим, что отношение включения наделяет C частичным порядком, превращая его в дистрибутивную решётку.

Рассмотрим над \mathbb{R} векторное пространство \mathcal{L} размерности 2^n . Его базис отождествим с элементами C , то есть, со всевозможными подмножествами в W . Таким образом, каждый элемент пространства \mathcal{L} представляет собой формальную линейную комбинацию подмножеств:

$$r_1 c_1 + r_2 c_2 + \dots + r_{2^n} c_{2^n} \in \mathcal{L}, \quad (r_i \in \mathbb{R}, c_i \in C).$$

В пространстве \mathcal{L} естественным образом определены сложение элементов и их умножение на действительные числа. Вместе с тем заметим, что на \mathcal{L} по линейности продолжаются такие операции над множествами, как *пересечение* \cap , *объединение* \cup , *разность* \setminus , *симметрическая разность* Δ , дополнение до W , и т.д. Пространство \mathcal{L} с введёнными таким образом операциями условимся называть *алгеброй подмножеств множества W* над полем \mathbb{R} . (Фактически, это частный случай алгебры Мёбиуса булевана, см. [22].)

Напомним определение группы перестановок [23]. Для множества W и для произвольной конечной группы G рассмотрим отображение $\pi: W \times G \rightarrow W$, причём образ пары (w, g) условимся обозначать как $w^g \in W$. Допустим, что отображение π удовлетворяет двум следующим условиям:

- 1) для всяких элементов $w \in W$ и $g, h \in G$ выполняется равенство $w^{(gh)} = (w^g)^h$, и
- 2) если $w^g = w$ для всех $w \in W$, то g является единичным элементом группы G .

Тогда пара (G, W) вместе с отображением π называется конечной группой *перестановок* множества W . (Если же выполняется только первое условие, то говорят, что группа G *действует на множестве W*.) Число

$|G|$ называется *порядком* группы перестановок, а $|W|$ – её *степенью*. Элементы из W называют *точками*. Для всякого $w \in W$ множество

$$w^G := \{w^g : g \in G\} \subseteq W$$

называется *орбитой* точки w при действии G . Число элементов орбиты называется её *длиной*. Все орбиты группы (G, W) образуют разбиение множества W . Если это разбиение состоит лишь из одной орбиты – самого множества W , то говорят, что группа перестановок *транзитивна*. Рассматриваемые далее группы будут считаться, как правило, транзитивными.

Заметим, что действие группы G на множестве W естественно продолжается на булеан C по правилу:

если $c = \{w_{\alpha_1}, \dots, w_{\alpha_n}\} \in C$, то $c^g = \{w_{\alpha_1}^g, \dots, w_{\alpha_n}^g\} \in C$.

Тем самым (G, W) индуцирует группу перестановок (G, C) , элементами орбит которой служат подмножества точек из W . Если мощность представителя такой орбиты равна k , то её называют (*симметризованной*) *орбитой* группы (G, W) *арности* k , или k -*орбитой*, (или даже просто *орбитой* в тех случаях, когда арности не существенны или очевидны из контекста).

Условимся обозначать орбиты группы (G, C) как h_1, h_2, \dots, h_N , где N – общее число орбит. Арность орбиты h_i обозначим через m_i , а её длину – через z_i , т.е.,

$$m_i = |c_j^{(i)}|, \quad z_i = |h_i|.$$

Заметим, что $z_i = |G|/|G_i|$, где G_i – стабилизатор в G произвольного представителя орбиты h_i . Элементы орбит будем нумеровать двумя индексами,

$$h_i = \{c_j^{(i)} : j = 1, \dots, z_i\},$$

где верхний индекс указывает на номер орбиты, а нижний является номером данного элемента при лексикографическом упорядочении подмножеств, входящих в данную орбиту. Орбиту

$$h_{d(i)} := \overline{\{c_j^{(i)} : j = 1, \dots, z_i\}}, \quad (3)$$

состоящую из дополнений до W подмножеств, образующих h_i , будем называть *дополнением* орбиты h_i .

На введённой выше алгебре \mathcal{L} определим действие группы (G, W) по естественному правилу:

$$\left(\sum r_i c_i\right)^g = \sum r_i c_i^g, \quad g \in G.$$

Обозначим через \mathcal{L}^G подалгебру элементов из \mathcal{L} , не-подвижных при этом действии. Несложно заметить, что базис этой алгебры образуют элементы

$$c_1^{(i)} + c_2^{(i)} + \dots + c_{z_i}^{(i)}, \quad (i = 1, 2, \dots, N).$$

Учитывая их очевидную связь с орбитами, условимся далее обозначать их точно так же, как и орбиты:

$$h_i := c_1^{(i)} + c_2^{(i)} + \dots + c_{z_i}^{(i)} \in \mathcal{L}^G.$$

Вспомним, что на \mathcal{L} заданы теоретико-множественные операции. Они естественно продолжаются на пространство \mathcal{L}^G , превращая его в алгебру. Например, объединение множеств \cup порождает следующую операцию \sqcup на \mathcal{L}^G : если

$$a = \sum r_i h_i \in \mathcal{L}^G, \quad b = \sum s_j h_j \in \mathcal{L}^G$$

– два произвольных элемента из \mathcal{L}^G , то

$$a \sqcup b = \sum \sum r_i s_j (h_i \sqcup h_j) \in \mathcal{L}^G,$$

$$h_i \sqcup h_j = (c_1^{(i)} + \dots + c_{z_i}^{(i)}) \cup (c_1^{(j)} + \dots + c_{z_j}^{(j)})$$

$$= \sum_{p=1}^{z_i} \sum_{q=1}^{z_j} c_p^{(i)} \cup c_q^{(j)} = \sum_{t=1}^N \gamma_{ij}^t h_t \in \mathcal{L}^G.$$

Величины γ_{ij}^t называются *структурными константами* алгебры \mathcal{L}^G для операции \sqcup , а образуемый ими *структурный тензор* полностью определяет эту операцию. Аналогично на \mathcal{L}^G могут быть продолжены и другие теоретико-множественные операции. Вместе с тем несложно заметить, что такие операции могут быть выражены через \sqcup и унарную операцию дополнения орбит, введенную формулой (3). Например, если δ_{ij}^t – структурные константы для операции Π , порождаемой пересечением множеств, то

$$\delta_{ij}^t = \gamma_{d(i)d(j)}^{d(t)}.$$

В работах [10, 25] введено следующее понятие.

Определение 1. Алгеброй *орбит* группы перестановок (G, W) будем называть пространство \mathcal{L}^G вместе с его фиксированным базисом $\langle h_1, h_2, \dots, h_N \rangle$, операцией \sqcup и оператором дополнения d . Таким образом,

$$\mathcal{L}^G = \mathbb{R}\langle h_1, h_2, \dots, h_N \rangle.$$

Для простоты условимся называть операцию в алгебре орбит умножением. Её структурные константы выражаются через следующую матрицу:

Определение 2. Кратностью *вложения* орбиты h_i в орбиту h_j назовём целое число v_j^i , равное количеству элементов орбиты h_i , входящих как подмножества в произвольный элемент из h_j :

$$v_j^i = |\{c_k^{(i)} \in h_i : c_k^{(i)} \subseteq c_1^{(j)}\}|.$$

Если $v_j^i > 0$, то будем говорить, что орбита h_i *вложима* в орбиту h_j , или же что h_i является *подорбитой* h_j . Тем самым на множестве орбит вводится отношение частичного порядка.

Понятно, что если арности орбит h_i и h_j совпадают, т.е., $m_i = m_j$, то $v_j^i = 0$ если $h_i \neq h_j$, и $v_i^i = 1$; если же $m_i < m_j$, то $v_j^i = 0$. Таким образом, $N \times$ -матрица *вложений* орбит

$$V(G, W) = (v_j^i)$$

является верхне-треугольной с единицами на главной диагонали, а следовательно, обратимой. Пусть

$$V^{-1}(G, W) = (\mu_j^i).$$

Утверждение 3. Структурные константы алгебры орбит выражаются через кратности вложения следующим образом:

$$\gamma_{ij}^t = \sum_{s=1}^N v_s^i v_s^j \mu_t^s.$$

Таким образом, все свойства алгебры орбит полностью определяются матрицей вложимостей.

IV. ПРИМЕРЫ АЛГЕБР ОРБИТ

Пример 1. Пусть $G = \{1\}$ – единичная группа. Её алгебра орбит совпадает с \mathcal{L} , матрица вложимостей V совпадает с дзета-функцией булеана, а V^{-1} – с его функцией Мёбиуса [22]. Свойства матрицы V в этом случае интенсивно исследовались [25–29].

Пример 2. (Алгебра графов) Пусть S_n – симметрическая группа перестановок на множестве W . Определим действие S_n на множестве $E = W^{(2)}$ всех неупорядоченных пар различных элементов из W по правилу:

$$\{w_{\alpha_1}, w_{\alpha_2}\}^g = \{w_{\alpha_1}^g, w_{\alpha_2}^g\}, \text{ где } g \in S_n.$$

Группа перестановок $S_n^{(2)} = (S_n, W^{(2)})$ называется *парной симметрической группой* [23–25]. Её можно рассматривать как группу перестановок рёбер полного графа K_n , индуцированную всеми возможными перенумерациями его вершин. Алгебру орбит группы $S_n^{(2)}$ называется [10, 30] *алгеброй графов* и обозначается как \mathcal{G}_n . Поясним связь этого понятия с графами.

Пусть h_i – одна из -орбиты группы $S_n^{(2)}$. Каждый её элемент является подмножеством рёбер полного графа K_n и, следовательно, может рассматриваться как некоторый *помеченный* граф Γ на n вершинах и с k рёбрами. Графы, отвечающие другим элементам той же орбиты, будут отличаться от Γ только нумерациями вершин, что позволяет отождествить орбиту h_i с *непомеченным* графом $\{\Gamma\}$, то есть, с классом изоморфизма графа Γ . Например, алгебра \mathcal{G}_4 порождается 11 непомеченными графиками, показанными на рис. 1.

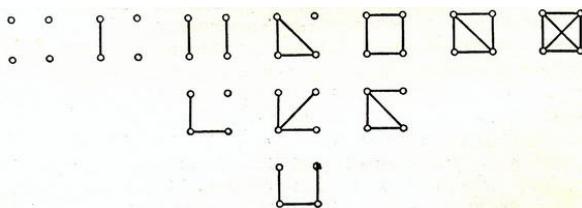


Рис. 1. Классы изоморфизма графов на 4 вершине

Таким образом, орбиты $h_i \in \mathcal{G}_n$ можно считать формальной суммой всех помеченных графов, изоморфных Γ . Ниже, для наглядности, изображение графа в фигурных скобках обозначает его орбиту, а в круглых скобках – элементы орбиты. Например, на рис. 2 показана орбита графа $2K_2$.

$$\{\bullet\otimes\bullet\} \cdot \left\{ [\bullet\otimes\bullet] + [\bullet\bullet] + [\square] \right\}$$

Рис. 2. Орбита группы $S_n^{(2)}$, соответствующая графу $2K_2$

Умножение непомеченных графов в алгебре \mathcal{G}_n сводится к объединению множеств их рёбер, то есть, фактически, к наложению их изображений. По линейности это умножение продолжается на орбиты; например, процесс умножения орбит $\{2K_2\}$ и $\{2K_1 \cup K_2\}$ показан на рис. 3.

$$\begin{aligned} & \{\bullet\otimes\bullet\} \cdot \{\bullet\otimes\bullet\} = \\ & \{[\bullet\otimes\bullet]\} \cdot \{[\bullet\bullet] + [\square] + [\square]\} = \\ & \{[\bullet\bullet]\} \cdot \{[\bullet\otimes\bullet] + [\bullet\bullet] + [\square] + [\square] + [\square]\} = \\ & \{\square\} \cdot \{[\bullet\otimes\bullet] + [\bullet\bullet] + [\square] + [\square] + [\square]\} = \\ & \{[\bullet\otimes\bullet] + [\bullet\otimes\bullet] + [\bullet\otimes\bullet] + [\bullet\otimes\bullet] + [\bullet\otimes\bullet] + [\bullet\otimes\bullet]\} + \\ & \{[\bullet\bullet] + [\bullet\bullet] + [\square] + [\square] + [\square] + [\square]\} + \\ & \{[\square] + [\square] + [\square] + [\square] + [\square] + [\square]\} = \\ & 2 \cdot \{\bullet\otimes\bullet\} + \{\bullet\otimes\bullet\} \dots \end{aligned}$$

Рис. 3. Пример умножения в алгебре графов \mathcal{G}_4

Заметим, что кратность вложения графа в граф H равна числу суграфов в H , изоморфных Γ . Соответствующая матрица вложимостей полностью определяют алгебру графов.

Пример 3. (Алгебра ожерелей) Назовём (n,m) -ожерельем [24] правильный n -угольник на плоскости, вершины которого окрашены в два цвета, например, чёрный и белый, причём количество чёрных вершин равно m . Два ожерелья изоморфны, если они могут быть совмещены с помощью вращений на плоскость и/или переворота в пространстве. Если же переворот запрещён, то ожерелья называются *ориентированными*, (их вершины удобно считать равносторонними треугольниками, одна из высот которых продолжает рёбро n -угольника). Например, на рис. 4 показаны все четыре класса изоморфизма ориентированных $(6,3)$ -ожерелей. Заметим, что N_2 и N_3 совмещаются переворотом, и поэтому число неизоморфных неориентированных ожерелей равно трём.

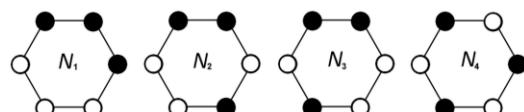


Рис. 4. Неизоморфные ориентированные $(6,3)$ -ожерелья

Как несложно, заметить, неизоморфные (n,m) -ожерелья взаимно-однозначно соответствуют m -орбитам дидральной группы перестановок D_n , а ориентирован-

ные ожерелья – m -орбитам циклической группы \mathbb{Z}_n . Умножение в соответствующих алгебрах орбит вводится аналогично умножению в алгебре графов.

Как орбиты можно рассматривать не только графы и ожерелья, но и многие другие комбинаторные конструкции. Например, если $S_n^{(r)} = (S_n, W^{(r)})$ – группа перестановок, индуцируемая действием S_n на множестве $W^{(r)}$ всех r -элементных подмножеств множества W , то её орбиты соответствуют r -гиперграфам на n вершинах, не имеющих кратных гиперребер. Если же рассмотреть действие S_n на множестве $W^{[2]}$ всех упорядоченных пар различных точек из W , то орбиты группы $S_n^{[2]} = (S_n, W^{[2]})$ отвечают n -вершинным ориентированным графикам без кратных дуг и петель. В каждом из подобных случаев, конструкция алгебры орбит определяет умножение соответствующих объектов.

V. ГИПЕРГРАФЫ ОРБИТ

Как было замечено выше, орбиты некоторых групп соответствуют таким объектам, как графы, орграфы, ожерелья, и т.п. Как оказывается [10, 31], в определённом смысле это верно и в общем случае: *каждой паре орбит произвольной группы G можно сопоставить некоторый гиперграф*. Покажем, как это можно сделать.

Напомним, что *гиперграфом \mathcal{H}* называется [12] пара (V, E) , где V – непустое множество вершин, а E – семейство непустых подмножеств V , называемых *гиперребрами*. *Степенью вершины $v \in V$* называется число гиперребер, содержащих эту вершину, а *степенью гиперребра $e \in E$* – количество вершин в нём. В r -гиперграфе все гиперребра имеют одну и ту же степень r , причём, как очевидно сумма степеней всех вершин такого гиперграфа в r раз больше числа гиперребер. Таким образом, 2-гиперграфы являются обычными графиками, (возможно, с кратными рёбрами).

Для построения гиперграфа орбиты группы (G, W) зафиксируем какую-либо её орбиту

$$h_i = \{c_p^{(i)} : p = 1, \dots, z_i\},$$

и условимся называть её *модулем*, а элементы $c_p^{(i)}$ – *вершинами*. Арность модуля h_i обозначим через m_i , кроме того, условимся об обозначении $V^{(i)} := h_i$.

Пусть теперь h_j – некоторая k -орбита той же группы, содержащая элемент $c_l^{(j)} = \{w_{\alpha_1}, \dots, w_{\alpha_k}\} \in h_j$. Каждой из точек $w_{\alpha_q} \in c_l^{(j)}$ сопоставим множество

$$e_q^{(i)} = \{c_p^{(i)} \in h_i : w_{\alpha_q} \in c_p^{(i)}\}$$

тех вершин модуля, в которые эта точка входит, и рассмотрим набор

$$E_j^{(i)} = \langle e_1^{(i)}, e_2^{(i)}, \dots, e_k^{(i)} \rangle$$

всех таких множеств.

Определение 3. Гиперграф $\mathcal{H}_j^{(i)} = (V^{(i)}, E_j^{(i)})$ называется *гиперграфом орбиты h_j по модулю h_i* . Число вершин этого гиперграфа равно длине модуля, а число его гиперребер – арность орбиты h_j .

Утверждение 3. С точностью до изоморфизма, гиперграф $\mathcal{H}_j^{(i)}$ не зависит от выбора представителя $c_l^{(j)}$ орбиты h_j . Каждое его гиперребро содержит $m_i z_i / n$ вершин, где $n = |W|$ есть степень группы перестановок G , а m_i и z_i – арность и длина модуля h_i .

Пример 4. Рассмотрим парную симметрическую группу $S_n^{(2)} = (S_n, W^{(2)})$ на множестве $W^{(2)}$ из $n(n - 1)/2$ точек. Как было замечено выше, её орбитам соответствуют непомеченные графы на n вершинах. Возьмём в качестве модуля орбиту арности $n - 1$ и длины n , отвечающую двудольному графу $K_{1,n-1}$. Гиперграфы по такому модулю имеют n вершин, а их гиперребра имеют мощность $n(n - 1) \frac{n(n-1)}{2} = 2$. Таким образом, в этом случае гиперграфы орбит будут обычными графиками, с точностью до изоморфизма совпадающими с графиками орбит.

Пример 5. В качестве менее тривиального примера рассмотрим группу $S_6^{(2)}$ на 15 точках, которые отождествим с рёбрами полного графа K_6 так, как это показано в правой верхней части рис. 5. В качестве модуля возьмём 3-орбиту длины 15, соответствующую графу $3K_2$:

$$\{3K_2\} = \left\{ \begin{array}{l} \{1,4,14\}, \{3,6,13\}, \{2,5,15\}, \{4,7,10\}, \{1,8,12\}, \\ \{3,9,10\}, \{6,8,11\}, \{2,9,12\}, \{5,7,11\}, \{9,11,14\}, \\ \{7,12,13\}, \{8,10,15\}, \{13,14,15\}, \{1,3,5\}, \{2,4,6\} \end{array} \right\}.$$

Гиперграфы по этому модулю будут иметь 15 вершин, а все гиперребра иметь мощность 3. В частности, несвязный 3-гиперграф орбиты, соответствующей графу $K_4 \cup 2K_1$, показан в нижней части рис. 5.

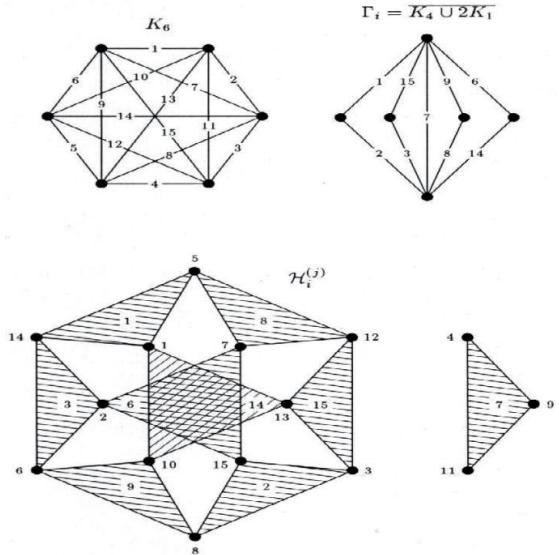


Рис. 5. Пример гиперграфа по модулю $3K_2$

Гиперграфы $\mathcal{H}_j^{(i)}$ позволяют перенести на орбиты такие понятия как степени вершин, связность, раскрасиваемость, наличие циклов, и т.п.

VI. ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОРБИТ

Пусть G – некоторая группа перестановок. В общей форме задача восстановления орбит этой группы формулируется следующим образом: для заданного линейного оператора $\partial: \mathcal{L}^G \rightarrow \mathcal{L}^G$ на алгебре орбит \mathcal{L}^G , назовём орбиты h_p и h_q эквивалентными, если

$$\partial(h_p - h_q) = 0.$$

Если орбита эквивалентна только самой себе, назовём её восстановимой по ∂ . Под задачей восстановления будем понимать поиск условий, при которых орбиты группы G будут восстановимы по ∂ .

Варьируя группы G и операторы ∂ , получаем ряд различных задач восстановления. При этом, аналоги классических проблем возникают в тех случаях, когда ∂ строится на основе операций разности и симметрической разности множеств.

Пример 6 (*Обобщение проблемы Харари*). Пусть транзитивная группа G действует на множестве $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, и пусть

$$\sigma = \{w_1\} + \{w_2\} + \dots + \{w_n\} \in \mathcal{L}^G$$

будет единственной орбитой этой группы арности 1. Определим действие оператора ∂ на -орбиту $h \in \mathcal{L}^G$ как

$$\partial(h) = h \setminus \sigma + (k - n)h \in \mathcal{L}^G. \quad (3)$$

где \setminus означает продолжение на \mathcal{L}^G разности множеств.

Как несложно показать, для $G = S_n^{(2)}$ такой оператор на алгебре графов порождает проблему Харари о рёберном восстановлении. Как показано в [9], если в орбите h_i имеется хотя бы одна подорбита h_j такая, что

$$(-1)^{m_j} \nu_i^j z_i > \gamma_{id(i)}^{d(j)} z_i,$$

то орбита h_i восстановима по ∂ . Заметим, что для графов это улучшает результаты Ловаса и Мюллера из раздела 2. Известно [32], что все k -орбиты конечных абелевых групп восстановимы по ∂ при $k \geq 3$, а гамильтоновых групп – при $k \geq 4$. В работе [33] доказана восстановимость k -орбит конечных полурегулярных групп перестановок при $k \geq 5$.

Пример 7 (*Обобщение проблемы Улама-Келли*). Зададим какую-либо орбиту $h_i \in \mathcal{L}^G$ и определим оператор $\partial_i: \mathcal{L}^G \rightarrow \mathcal{L}^G$ следующим образом:

$$\partial_i(h) = h \setminus h_i \in \mathcal{L}^G. \quad (4)$$

Можно показать, что для $G = S_n^{(2)}$ и $h_i = \{K_{1,n-1}\} \in \mathcal{G}_n$, восстановление по ∂_i превращается в проблему Улама-Келли. Отметим, что при этом ряд результатов о восстановлении графов удаётся перенести на орбиты. Например, в [31] показано, что если гиперграф $\mathcal{H}_j^{(i)}$ орбиты h_j несвязан, то эта орбита восстановима по ∂_i . Более того, гипотеза Улама-Келли справедлива в том и только том случае, когда алгебра графов \mathcal{G}_n при $n \geq 3$ порождается, как кольцо, несвязными графами [10, 22].

Пример 8. (*Обобщение проблемы Стенли*) Заменив в формуле (4) операцию \setminus на симметрическую разность Δ множеств, получим оператор

$$s_i(h) = h \Delta h_i \in \mathcal{L}^G. \quad (5)$$

Для $G = S_n^{(2)}$ и $h_i = \{K_{1,n-1}\} \in \mathcal{G}_n$ возникающая задача совпадает с проблемой Стенли о восстановлении графов по переключениям их вершин. Учитывая это, будем говорить о восстановлении орбит по оператору (5) как об их δ_i -восстановлении. Некоторые условия такого восстановления рассматриваются в следующем разделе.

VII. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОРБИТ ПО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМ

Как уже было сказано, в работе [11] было показано, что если число n вершин графа не кратно четырём, то он восстановим по переключениям. Доказательство этого результата основывается на следующей лемме, опирающейся, в свою очередь, на результаты работы [34].

Лемма 1. (Р. Стенли, 1984) *Пусть степени вершин графа Γ равны d_1, d_2, \dots, d_n . Тогда, если*

$$(-1)^{d_1} + (-1)^{d_2} + \dots + (-1)^{d_n} \neq 0,$$

то Γ восстанавливается по переключениям вершин.

Как оказывается, справедлив более общий результат.

Утверждение 4. *Пусть дана группа перестановок G и некоторая её -орбита h_i длины m . Тогда орбита h_i той же группы δ_i -восстановима при выполнении неравенства*

$$(-1)^{d_1} + (-1)^{d_2} + \dots + (-1)^{d_m} \neq 0,$$

где числа d_1, d_2, \dots, d_m являются степенями вершин гиперграфа $\mathcal{H}_j^{(i)}$ орбиты h_i по модулю h_i . ■

Это утверждение влечёт за собой ряд следствий.

Следствие 1. *Если длина орбиты h_i нечётна, то каждая орбита δ_i -восстановима.*

Следствие 2. *Все орбиты транзитивной группы перестановок нечётного порядка δ_i -восстановимы для любого i .*

Следствие 3. *Если гиперграф $\mathcal{H}_j^{(i)}$ имеет $n \equiv 2(\text{mod } 4)$ вершин, а степени гиперребер в нём чётные, то каждая орбита будет δ_i -восстановимой.*

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы. В работе задача восстановления графов по переключениям их вершин, предложенная ранее Р. Стенли, перенесена на орбиты групп, действующих на булевана. Для таких орбит получены ряд условий восстановимости, которые, в зависимости от выбора группы, применимы к таким комбинаторным объектам, как орграфы, гиперграфы, ожерелья, и т.п. Новизна подхода связана с использованием введённой ранее автором алгебры орбит. Дальнейшее развитие метода предполагает изучение действия групп на решётках, отличных от булевана, в частности, на решётках подпространств векторных пространств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lauri J., Scapellato R.* Topics in Graph Automorphisms and Graph Reconstruction. – Cambridge University Press, Cambridge, 2003. – 172 p.
2. Уlam С. Нерешенные математические задачи. – М.: Наука, 1964. – 168 с.
3. Harary F. On the reconstruction of a graph from a collection of subgraphs // Theory of graphs and its applications. – Prague, 1964. – P. 47-52.
4. Stockmeyer P.K. The falsity of the reconstruction conjecture for tournaments // J. Graph Theory. – 1977. – Vol. 1. – P. 19-25.
5. Kocay W.L. A family of non-reconstructible hypergraphs // J. Comb. Theory. – 1987. – Vol. 42B. – P. 46-63.
6. Kocay W.L. A note on non-reconstructible 3-hypergraphs // Graphs and Combinatorics. – 2016. – Vol. 32. – P. 1945-1963.
7. Cameron P.J. Some open problems on permutation groups // Groups, Combinatorics and Geometry. – Cambridge University Press, 1992. – P. 340-350.
8. Cameron P.J. Stories from the age of reconstruction // Congressus Numerantium. – 1996. – Vol. 113. – P. 31-41.
9. Mnukhin V.B. Reconstruction of k-orbits of a permutation group // Math. Notes. – 1987. – Vol. 42. – P. 975-980.
10. Mnukhin V.B. The k-orbit reconstruction and the orbit algebra // Acta Appl. Math. – 1992. – Vol. 29. – P. 83-117.
11. Stanley R.P. Reconstruction from vertex-switching // J. Combin. Theory. – 1985. – Vol. 38B. – P. 132-138.
12. Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. Лекции по теории графов. – М.: Наука, 1990. – 384 с.
13. Bondy J.A., Hemminger R.L. Graph reconstruction—a survey // J. Graph Theory. – 1977. – Vol. 1, No. 3. – P. 227-268.
14. Bondy J.A. A graph reconstructor's manual // Surveys in Combinatorics. – Cambridge University Press, 1991. – P. 221-252.
15. Скумс П.В., Тышкевич Р.И. Гипотеза реконструируемости для графов с ограничениями на 4-вершинные простые цепи // Дискретный анализ и исследование операций. – 2009. – Т. 16, № 4. – С. 87-96.
16. Muller V. The edge reconstruction conjecture is true for graphs with more than $n \log_2 n$ edges // J. Combinator. Theory. – 1977. Vol. 22B. – P. 281-283.
17. Lovasz L. A note on the line reconstruction problem // J. Combin. Theory. – 1972. – Vol. 13B. – P. 109-110.
18. Ellingham M.N., Royle G.F. Vertex switching reconstruction of subgraph numbers and triangle-free graphs // J. Combin. Theory. – 1992. – Vol. 54B. – P. 167-177.
19. Krasikov I., Roditty Y. Switching reconstruction and diophantine equations // J. Combin. Theory. – 1992. – Vol. 54B. – P. 189-195.
20. Krasikov I. A note on the vertex switching reconstruction // Internat. J. Math. Sci. – 1988. – Vol. 11, No. 4. – P. 825-827.
21. Ramachandran S. Graph reconstruction - some new developments // AKCE J. Graphs. Combin. – 2004. – Vol. 1, No. 1. – P. 51-61.
22. Mnukhin V.B. Introduction to Möbius Algebras // Discrete Mathematics and Applications, Vol. 11. – University of East Anglia, Norwich, 1994. – 22 p.
23. Kerber A. Algebraic Combinatorics via Finite Group Actions. – Mannheim, Wien, Zurich: BI-Wiss.-Verl., 1991. – 436 p.
24. Харари Ф., Палмер Э. Перечисление графов. – М.: Мир, 1977. – 324 с.
25. Mnukhin V.B. Combinatorial Properties of Partially Ordered Sets and Group Actions // Discrete Mathematics and Applications, Vol. 8. – University of East Anglia, Norwich, 1993. – 58 p.
26. Wilson R.M. A diagonal form for the incidence matrices of t -subsets vs. k -subsets // European Journal of Combinatorics. – 1990. – Vol. 11, – No. 6. – P. 609-615.
27. Wilson R.M. Incidence matrices of t -designs // Linear Algebra Appl. – 1982. – Vol. 46. – P. 73-82.
28. Frankl P. Intersection theorems and mod p rank of inclusion matrices // J. Combin. Theory. – 1990. – Vol. 54A, No. 1. – P. 85-94.
29. Mnukhin V.B., Siemons J.I. On the modular homology in the Boolean algebra // Journal of Algebra. – 1996. – Vol. 179. – P. 191-199.
30. Мнухин В.Б. Базис алгебры инвариантов графов // Математический анализ и его приложения. – Ростов-на-Дону: РГУ, 1983. – С. 55-60.
31. Мнухин В.Б. Восстановление несвязных k -орбит группы перестановок // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Естеств. науки. – 1989. – № 1. – С. 35-40.
32. Mnukhin V.B. The k -orbit reconstruction for Abelian and Hamiltonian groups // Acta Appl. Math. – 1998. – Vol. 52. – P. 149-162.
33. Maynard P., Siemons J. On the reconstruction index of permutation groups: semiregular groups // Aequationes Mathematicae. – 2002. – Vol. 64. – P. 218-231.
34. Diaconis P., Graham R.L. The Radon transform on \mathbb{Z}_2^k // Pacific Journal of Mathematics. – 1985. – Vol. 118, No. 2. – P. 323-345.

Разработка системы мониторинга сточных вод с использованием нейросетевых технологий

Сидельников Владимир Иванович
Санкт-Петербургский
государственный университет
промышленных технологий и дизайна
Санкт-Петербург, Россия
vsid1952@mail.ru

Волерт Александр Владимирович
Санкт-Петербургский
государственный университет
промышленных технологий и дизайна
Санкт-Петербург, Россия
volert88@mail.ru

Кошкаров Александр Васильевич
Санкт-Петербургский
государственный университет
промышленных технологий и дизайна
Санкт-Петербург, Россия
alvkoksharov@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме оценки состояния водных ресурсов и качества очистки промышленных стоков. Обеспечение непрерывного мониторинга сбрасываемой воды осуществляется с использованием нейронной сети с необходимой скоростью обработки изображений и последующим ответом. Предложен алгоритм подготовки данных и обоснование выбора нейронных сетей. Это создает основу для разработки автоматизированной системы контроля и управления состояния сбрасываемых промышленных стоков.

Большинство водных ресурсов, таких как реки, пруды и притоки, подчиняются строгим стандартам чистоты. Существуют различные требования к воде исходя из целей и задач её применений. Например, оросительная вода не должна иметь чрезмерной солености или содержать опасные вещества, которые могут поглощаться растениями или оседать в почве, создавая риск для экосистем. Требования к качеству воды для промышленности различаются в зависимости от типа производственной деятельности, а также строго регламентируются в части характеристик сточных вод. Когда дело доходит до питьевой воды, предпочтение отдается природным источникам воды, таким как грунтовые и поверхностные воды. Загрязнение таких ресурсов часто происходит в результате человеческой и инженерной деятельности.

Растущая промышленная экспансия и развитая инфраструктура оказывает значительное влияние на состояние водной среды из-за недостаточной очистки сточных вод. Загрязненные источники воды, представляя значительный риск для здоровья человека, окружающей среды и социальных структур, усугубляются недостаточной осведомленностью населения в этом вопросе. Рассмотрим лишь один из аспектов данной проблемы, связанный со сточными водами.

На множестве производств используется большое количество воды, которая в результате использования после очистки попадает в водоёмы существует проблема мониторинга состояния сточных воды. Данная область строго контролируется и в случае, когда производство сбрасывает в водоёмы воду, не проходящую по стандартам, на него накладываются строгие обременения и штрафы размерами в миллионы рублей. Например, при сбросе воды с поверхностно-активными веществами, образуется пена, которая выносит активный ил, используемый для очистки сточных вод. Активный ил

представляет собой высококонцентрированный белок, который начинает потреблять рыба, в следствии чего это может вызвать их гибель.

Состояние сбрасываемой воды на производствах обычно осуществляется путем забора воды и проведением лабораторного анализа персоналом, что может привести к сбросу большой объём пены в случае нештатных ситуаций. Во избежание этого предлагается встраивать в контур производства систему слежения, основанную на нейронных сетях, которая будет непрерывно оценивать и сигнализировать в случае необходимости о наличии пены в воде.

Как известно это некий алгоритм реализованный в виде нейронной сети, математической модели, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма.

Исходя из требуемых задач нейронная сеть должна быть оптимально построена на основе определенных для таких критериев как то скорость обработки изображения с последующим ответом, лёгкость и скорость обучения.

Для того что бы оптимизировать процесс обучения нейронной сети предлагается отдельно не размечать полученные данные, так как при встраивании в общий контур предприятия, данные будут иметь формат видео. Предлагается реализовать отдельный модуль, который будет обрабатывать видео, полученное с камер, в процессе обработки данный модуль будет разделять видео на кадры и выдавать в качестве результата своей работы кадры для дальнейшей передачи в нейронную сеть.

При построении архитектуры нейронной сети, учтывалось то, что скорость обучения и скорость получения ответа играют важную роль в создании реальной системы мониторинга. Таким образом были использованы следующие слои:

1. Conv2D –этот слой создает ядро свертки, которое свертывается с входными данными слоя по одному пространственному (или временному) измерению для создания тензора выходных данных.

2. MaxPooling2D – данный слой понижает дискретизацию входных данных по их пространственным изменениям (высоте и ширине), принимая максимальное

значение в окне ввода (размер которого определяется параметром) для каждого канала ввода. Окно сдвигается по шагам по каждому измерению.

3. BatchNormalization – слой, который нормализует свои входные данные. Пакетная нормализация применяет преобразование, которое поддерживает средний выходной сигнал близким к 0, а выходное стандартное отклонение близким к 1. Важно отметить, что пакетная нормализация работает по-разному во время обучения и во время вывода.

4. Dropout – применяет отсеи к входу. Слой Dropout случайным образом устанавливает входные единицы равными 0 с частотой на каждом шаге во время обучения, что помогает предотвратить переобучение. Входные данные, для которых не установлено значение 0, масштабируются на 1, так что сумма по всем входным параметрам не изменяется.

5. Dense – реализует операцию: вывод = активация (надо), где активация – это поэлементная функция активации, передаваемая в качестве аргумента активации, ядро – это матрица весов, созданная слоем, а смещение – созданный вектор смещения по слою.

Таким образом нейронная сеть после обучения будет иметь представление о том какие классы изображений имеются и наборы весов для изображения и соотношения к тому или иному классу. Предполагается, что на стадии обучения сети производство задало необходимые критерии для каждого класса и предоставило необходимый объем данных для обучения.

В результате своей работы нейронная сеть будет относить изображение к классу и в качестве результата выдавать название класса, вероятность которого была наиболее высока. После чего предполагается интеграция с общей системой предприятия и вывод на пульт управления для решения или автоматического регулирования определенного параметра.

В качестве примера использования рассмотрим две фотографии сбрасываемой воды:

Рис. 1. – вода без пены.

Рис. 2. – вода с пеной.

Допустим в рамках поставленной задачи от производства были определены критерии для двух классов: чистой воды и воды с пеной. При использовании комбинации слоёв, описанных выше, точность определения фото к определённому классу будет варьироваться от 92% до 98%. Однако стоит учитывать, что многое зависит от обучающей выборки, в среднем для достижения таких показателей необходимо 1500 фото/кадров из видео, так же необходимо понимать, что при составлении выборки необходимо использовать отличающиеся фото.

Для того что бы реализовать данный подход к мониторингу воды использовался язык программирования Python и дополнительные библиотеки: moviepy, numpy, keras, tensorflow. Если рассматривать данный подход для внедрения в технологический процесс производства, то возможно использование следующих аппаратных устройств:

1. Камера видеонаблюдения с разрешением 1920x1080 и возможностью передачи видео с частотой 60 fps.



Рис. 1. Фото воды



Рис. 2. Фото воды с пеной

2. Электронно-вычислительная машина с достаточной мощностью для принятия и обработки видео с последующей обработкой кадров нейронной сетью.

3. Цифро-аналоговый преобразователь способный подавать от 1 до 12 вольт.

При использовании вышеперечисленных аппаратных устройств возможно использование данного подхода, для вывода на пульт управления сигналов о наличии/отсутствии пены в воде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данного подхода уменьшает влияние человеческого фактора, позволяет за не большие вложения обезопасить производство от штрафов и критики. Обеспечивает постоянный мониторинг и стабильное обнаружение пены в сбрасываемой воде создает основания для реализации автоматизированной системы контроля и управления качеством промышленных стоков. Что важно при внедрении данного подхода не требуется перестройка уже существующего технологического процесса производства.

ЛИТЕРАТУРА

- Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В. Нейросетевые методы оценки качества поверхностных вод по гидрологическим показателям // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2002.
- Драчева С.М. Борьба с загрязнением рек, озёр и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. – Изд-во «Наука», 1964.
- Маслова А., Панарин В., Гришаков К., Рыбка Н., Котова Е., Селезнева Д. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования уровней загрязнения воздуха и водных объектов // Экология и промышленность России. – 2019. – 23.
- Розенталь О.М. и Федотов В.Х. Нейросетевой анализ как основа будущей системы водно-экологического регулирования // Водные ресурсы. – 2023.

Разработка и исследование квантовой нейронной сети для сжатия и реконструкции изображений

Гушанский Сергей Михайлович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
smgushanskyi@sfedu.ru

Потапов Виктор Сергеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vpotapov@sfedu.ru

Поленов Максим Юрьевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
mpolenov@sfedu.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке и исследованию квантовой нейронной сети для задач сжатия и восстановления изображений. В современных условиях постоянно возрастающего объема визуальной информации эффективные методы сжатия и восстановления изображений играют ключевую роль. В данной работе предлагается инновационный подход, основанный на использовании квантовых вычислений и нейронных сетей, что позволяет значительно повысить эффективность процессов сжатия и восстановления изображений. В статье рассматриваются основные принципы и методы построения квантовых нейронных сетей, а также их применение в задачах обработки изображений. Проведен сравнительный анализ традиционных методов сжатия изображений и предложенного квантового подхода, что позволяет выявить преимущества и недостатки каждого метода. Для реализации квантовой нейронной сети использованы современные квантовые алгоритмы и библиотеки, такие как Qiskit и Pennylane. Результаты экспериментов демонстрируют, что квантовая нейронная сеть способна обеспечить более высокую степень сжатия изображений без значительной потери качества по сравнению с классическими методами. Также предложенная модель показала высокую точность восстановления изображений, что подтверждает перспективность использования квантовых нейронных сетей в данной области.

Abstract. The article is devoted to the development and research of a quantum neural network for problems of image compression and restoration. In modern conditions of the ever-increasing volume of visual information, effective methods of image compression and restoration play a key role. This work proposes an innovative approach based on the use of quantum computing and neural networks, which can significantly increase the efficiency of image compression and restoration processes. The article discusses the basic principles and methods of constructing quantum neural networks, as well as their application in image processing problems. A comparative analysis of traditional image compression methods and the proposed quantum approach has been carried out, which makes it possible to identify the advantages and disadvantages of each method. Modern quantum algorithms and libraries, such as Qiskit and Pennylane, were used to implement a quantum neural network. Experimental results demonstrate that a quantum neural network is capable of achieving a higher degree of image compression without significant loss of quality compared to classical methods. Also, the proposed model showed high accuracy of image restoration, which confirms the promise of using quantum neural networks in this area.

Квантовая нейросеть, квантовый алгоритм, кубит, модель квантового вычислителя, квантовое запутывание, суперпозиция, квантовый параллелизм.

Quantum neural network, quantum algorithm, qubit, quantum computer model, quantum entanglement, superposition, quantum parallelism.

I. ВВЕДЕНИЕ

Квантовая сеть [1] представляет собой новую сетевую архитектуру, которая применяет принципы квантовой механики для передачи и обработки данных. В отличие от традиционных методов восстановления данных, квантовые сети позволяют более эффективно и точно восстанавливать изображения, обрабатывая более сложную информацию с использованием меньшего количества битов и обеспечивая более быстрые параллельные вычисления. В данной статье рассматриваются методы реконструкции изображений с помощью квантовой сети, а также исследуется их потенциал в области обработки изображений. Описываются базовая структура квантовой сети, процессы сжатия и восстановления изображений, а также конкретные методы обучения параметров. В связи с широким применением цифровых изображений в различных областях, задачи сжатия и восстановления сигналов являются ключевыми направлениями исследований в цифровой обработке изображений и сигналов. Традиционный алгоритм сжатия и восстановления кодирует данные в разреженные векторы с использованием классического алгоритма разреженного кодирования [2] (CSC), после чего оригинальные данные восстанавливаются с помощью линейной комбинации этих векторов и словарных наборов. Этот алгоритм применяется в таких областях, как восстановление изображений, кодирование разреженных данных, распознавание образов и улучшение качества изображений. После сжатия размер файлов значительно уменьшается, что позволяет экономить место для хранения и полосу пропускания при передаче данных. Классический алгоритм восстановления позволяет декодировать и распаковывать изображения с сохранением их качества. С развитием технологий глубокого обучения и искусственного интеллекта алгоритмы сжатия и восстановления изображений стали более совершенны, открывая новые перспективы в этой области. Квантовые вычисления, основанные на принципах квантовой механики, получили широкое внимание в области обработки изображений благодаря

своей способности к параллельным вычислениям и использованию квантовых состояний. Квантовые сети обеспечивают эффективное сжатие и восстановление изображений, что открывает новые возможности для обработки больших объемов данных. В последние годы активно исследуются квантовые алгоритмы сжатия данных, такие как квантовая версия PCA и алгоритмы сжатия и восстановления изображений, демонстрирующие успешные результаты в этом направлении. Квантовые вычисления [3] значительно облегчают работу с большими потоками данных, возникающими при их передаче, что делает квантовые методы особенно актуальными для решения классических задач восстановления изображений. Предлагаемый алгоритм сжатия и восстановления изображений на основе квантовой сети объединяет классические подходы с квантовыми алгоритмами. Сначала классическая информация кодируется в квантовые состояния, которые затем обрабатываются в сети квантового сжатия и восстановления с использованием оптических схем. Результаты измерений преобразуются в сжатые и восстановленные изображения, а параметры квантовой сети оптимизируются с помощью алгоритма градиентного спуска. Такой подход эффективно реализует моделирование сжатия и восстановления изображений в оттенках серого. В статье также обсуждаются перспективы развития этого алгоритма и его применение в цифровой обработке изображений, объединяя квантовые вычисления с традиционными методами для улучшения современных технологий обработки данных.

II. КОДИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КВАНТОВЫЕ СОСТОЯНИЯ

Для изображений или общих классических данных матрица данных может быть преобразована в N-мерный вектор-строку X. Согласно основным принципам квантовых состояний, кодируем элементы в классическом векторе данных X как амплитуды вероятности Aj квантового состояния $|\psi\rangle = A_j|j\rangle$. Напротив, измерения выходных состояний также могут быть преобразованы в классические данные. Таким образом, x^j представляет собой реконструкцию классической информации, и нам необходимо сохранить сумму квадратов входных данных для декомпиляции состояния [4]. Состояния декодируются в данные, которые можно описать как:

$$x_i^j = \sqrt{\left|B_i^j\right|^2 \sum_{j=0}^{N-1} (x_i^j)^2},$$

где классические данные x получены в результате измерения функции потерь. Сети сжатия и реконструкции достигают целевого оптимального решения, а реконструкция данных x почти такая же, как исходные информационные данные x. И получается x путем объединения всех восстановленных классических выходных данных.

III. СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КВАНТОВОЙ СЕТИ

Сжатие и реконструкция изображений на основе квантовой сети разделены на две независимые сети, которые можно представить как сеть квантового сжатия UC и сеть квантовой реконструкции [5] UR соответственно, как показано на рис. 1. Целью сети сжатия является сжатие запутанных состояний в d-мерное гильбертово пространство с достаточно высокой точностью ори-

ентации для достижения сжатия квантовых состояний. Цель сети реконструкции состоит в том, чтобы реконструировать квантовые состояния d-мерного гильбертова пространства в N-мерное гильбертово пространство, делая при этом точность состояний слишком близкой к 100%. Следовательно, при заданных целях сжатия и реконструкции, полная квадратичная дисперсия [6] используется как функция потерь, выражаемая следующим образом:

$$|\Phi_i\rangle = \sum_{j=0}^{N-1} a_i^j |j\rangle = P_1 U_c |\psi_i\rangle = P_1 U_c \sum_{j=0}^{N-1} A_i^j |j\rangle,$$

где a – амплитуда вероятности j-го состояния вычислительного базиса в i-м выходном состоянии в U, а P1 – преобразование проекции, с помощью которого d-мерные состояния могут быть сжаты в состояния Ф. Единичная матрица (I) может состоять из P1 и P0, а именно P1 + P0 = I, как показано на рис. 1. Регулируя P1 и P0, можем добиться сжатия с разными размерами пространства. Кроме того, измеряя выходные состояния сети сжатия, можно рассчитать ошибку потерь в соответствии с заданной целью сжатия изображения, чтобы оптимизировать параметры сети и уменьшить потери.

IV. РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ КВАНТОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Процесс реконструкции может быть противоположным процессу сжатия. В частности, сеть реконструкции UR может представлять собой комбинацию квантовых вентилей в сети сжатия, которые подключены в обратном порядке, поэтому параметры сети необходимо переобучить. Это связано с тем, что обратная матрица U-1 сети сжатия U может использоваться непосредственно в качестве сети реконструкции только тогда, когда ошибка сжатой сети мала. Когда ошибки не почти равны нулю, переобученная реконструированная сеть более применима. Выходные состояния переобученной сети реконструкции можно представить как:

$$|\psi_i\rangle = \sum_{j=0}^{N-1} B_i^j |j\rangle = U_R P_1 U_c |\psi_i\rangle = U_R P_1 U_c \sum_{j=0}^{N-1} A_i^j |j\rangle$$

Номер выборки равен M, b_j представляет собой определенную целевую амплитуду вероятности выходного состояния в сети сжатия, а A_j может быть непосредственно использован в качестве выходной цели в сети реконструкции. Например, [0, 0, 0, 0, 0, 25, 0, 25, 0, 25] являются целевым усилением сжатия. Соответственно, A_j необходимо сжать примерно до 4-мерного пространства, как b_j. Поскольку все классические данные представляют собой действительные числа, значения функции потерь также являются действительными числами, а все построенные сети представляют собой действительные числа. В настоящее время существует множество квантовых систем и устройств, способных эффективно реализовывать квантовые схемы, и предложенная нами квантовая сеть больше подходит для оптических квантовых схем. Её схемная структура является гибкой, что позволяет легко создавать сложные квантовые схемы и реализовывать масштабируемость квантовых вычислений. Амплитуда вероятности выходного состояния получается путем измерения состояния Ψ_i , которое затем преобразуется в классическую информацию по уравнению

нию. Аналогичным образом, потеря между результатами измерения и целью используется для оптимизации параметров сети реконструкции. Затем упростим символ $U(k, k+1)$ до U_k , который можно описать на рис. 1. Более того, всегда сохраняем фазовый сдвиг α постоянным равным 0 ($\alpha = 0$), то есть квантовый вентиль всегда является настоящим квантовым вентилем, и нам просто нужно обучить θ .

$$U_k(\theta, \alpha) = U_{k, k+1}(\theta, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & & & & & & \\ \vdots & & \ddots & & & & & \\ & e^{i\alpha}\cos\theta & -\sin\theta & & & & & \\ & e^{i\alpha}\sin\theta & \cos\theta & & & & & \\ \vdots & & & \ddots & & & & \\ & & & & 1 & 0 & & \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{k \times k+1}$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & & & & & \\ \vdots & & \ddots & & & & \\ & 1 & & 0 & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & 0 & \\ \vdots & & & & & & \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{N-d \times d}$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & & & & & \\ \vdots & & \ddots & & & & \\ & 0 & & 1 & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & 1 & 0 \\ \vdots & & & & & & \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{N-d \times d}$$

Рис. 1. Квантовые гейты [6]: U_k , P_1 , P_0 . U_k – квантовый вентиль, P_1 и P_0 – преобразование проекции для сжатия

Комбинированный квантовый вентиль U представляет собой полное гомогенное преобразование всех кубитов, а $U(k, k+1)$ представляет собой квантовый вентиль преобразования k -го и векторные пространства. Для преобразования всех кубитов требуется интерферометр. Алгоритм градиентного спуска используется для обучения и обновления параметра θ для обновления параметров. Далее предлагается стратегия градиентного спуска для квантового сжатия и восстановления параметров сети. Среди них непрерывное преобразование, состоящее из N квантовых вентилей, рассматривается как однослойная комбинация квантовых вентилей U (рис. 2), в то время как реальная сеть требует многослойного квантового вентиля. Для пакетного обновления параметров относительно данных обучающего набора необходимо суммировать изменения градиента всех обучающих наборов. θ может быть инициализирован случайным или равномерным образом. Различные методы инициализации принесут разные эффекты обучения, и последующие исследования инициализации также достигли прогресса.

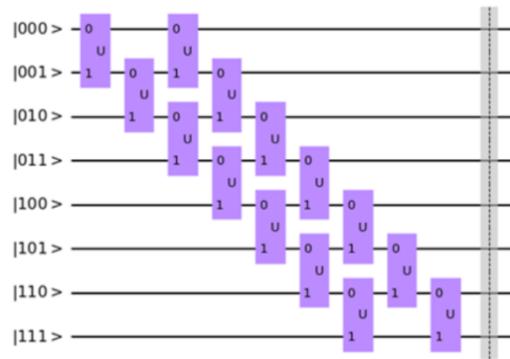


Рис. 2. Структура квантовой сети. В каждом слое этой квантовой сети квантовый вентиль $U(k, k+1)$ подключен в порядке кода Грэя. Число однослойных квантовых вентилей U равно $N - 1$

Для квантовых сетей основная часть заключается в обучении параметров отражения θ всех эффективных квантовых вентилей. Конкретный набор данных выбирается для онлайн-обучения с помощью моделирования, а фактическая физическая реализация может быть установлена в соответствующем формате.

$$gc(\theta_k^p) = \frac{\partial(P_i T_c A_i^j)}{\partial \theta_k^p} = \\ = P_i \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{[T_c(\theta_k^p + \Delta, 0) - T_c(\theta_k^p, 0)]}{\Delta} A_i^j$$

где фазовый параметр [7] равен $\alpha = 0$. Выходная ошибка LC схемы сжатия вычисляется посредством определения вывода для параметра θ . А Δ представляет собой дифференциальный размер шага θ , равномерно равный 10 в степени -8. Когда образец обучающего набора $+ \Delta$, вычисляется значение частной производной θ , соответствующее потерям. Значение частной производной рассчитывается с использованием всего набора выборок, и можем использовать алгоритм или алгоритм пакетного градиентного спуска для больших данных.

Эти изображения представляют собой двоичные изображения размером 4×4 , что означает, что входные векторы представляют собой вектор-столбцы размером 16×1 . Прямой градиентный спуск (GD) является наиболее прямым и удобным методом обучения фазовых параметров. Он подходит для предложенного нами облегченного обучения параметров сети квантовых вентилей. Согласно алгоритму градиентного спуска, параметр отражательной способности квантовой разреженной сети кодирования-декодирования может быть обучен линейно в пределах конечного периода итерации, и этот параметр также может быть непосредственно установлен в соответствующий интерферометр положения для физических реализаций. Псевдокод алгоритма обучения параметров показан в алгоритме 1. Во-первых, нам необходимо ввести набор данных изображения X , который необходимо сжать и восстановить, инициализировать параметры, обновить параметры посредством расчета функции потерь и отклонения параметров. И, наконец, верните обновленные результаты θ и параметров процесса.

Квантовые состояния [8] однородно вводятся в сеть квантового сжатия UC и сеть реконструкции UR для обучения. Установите следующие параметры сети: уровень UC (IC) – 12, уровень UR (IR) – 14, скорость обуче-

ния $\eta = 0,01$, каналы сжатия $d = 4$ и итерация обучения Ite = 150. Затем выходные квантовые состояния в сети реконструкции измеряются, вычисляется ошибка функции потерь и настраиваются параметры квантовых вентиляй. Очевидно, нам нужно обучить параметр θ , установив a равным 0. Следовательно, для обучения в сети сжатия требуется только 12-15 параметров, а в сети реконструкции задействовано 14-15 параметров. Затем метод независимого обучения будет использоваться для обучения параметров квантовой сети. Наконец, реализация реконструкции показана на рис. 4. Определяем точность как сходство между входными и выходными изображениями. Если $x_i \leq 0,01$, то можно считать, что пиксели в одних и тех же позициях двух изображений похожи, и совокупное количество похожих пикселей Sp $Sp \leq D^2$ увеличивается на 1 для изображения $D \times D$. Затем двоичный входной сигнал (рис. 4,а), передаваемый в квантовую сеть, будет преобразован в изображения в оттенках серого, где положения белых пикселей не меняются, а изменяются только значения белых пикселей из-за ошибки вычисления плавающих чисел в электронной системе. Если управляем выходным сигналом как двоичный, сравнивая выходные пороги, можно определить, что выходная амплитуда R_j будет равна

V. НАБОР ДАННЫХ И НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ

Используем Matlab для моделирования процесса квантового алгоритма, выполняемого на классическом компьютере. Сначала выбираем 25 бинарных изображений и задаем основные параметры сети. В процессе обучения настраиваем параметры сети в соответствии с эффектами сжатия и реконструкции изображений, включая количество слоев квантовой сети и скорость обучения [9]. Наконец, минимальные значения LC и LR почти равны 0, что означает, что обучение носит практический характер. При этом точность реконструкции обучения достигает 97,75%. Данные о сжатии и реконструкции могут быстро сходиться к целевому значению. Используя ту же структуру масштабной сети (словарь 16*16) для того же набора данных, сравним CSC на основе алгоритмов SVD с алгоритмом на основе QN.

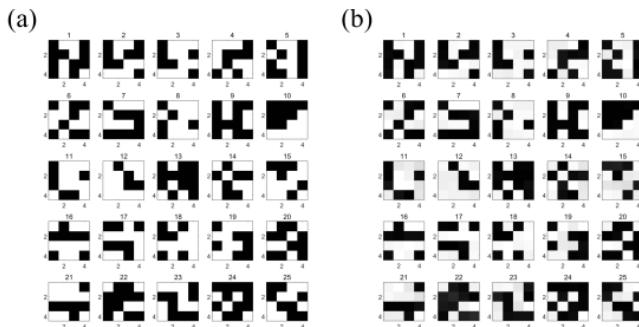


Рис. 3. Процесс обучения сжатию и реконструкции изображений. А. Входное двоичное изображение в размерности 4x4 ($xi, 0, 1, M = 25$). Эти изображения необходимо закодировать как амплитуды 3-кубитных состояний. Б. Результаты реконструкции изображения

Эти изображения имеют оттенки серого ($xi, [0, 1]$). с потерями при обучении (а). LC и LR будут почти равны 0 после 150 итераций обучения ($minLC = 0,017$, $minLR = 0,0,023$). Точность реконструкции (а). Максимальная точность составляет 97,75%. Сжатие и реконструкция (а) a25 – (f) и (e) за 150 обучающих итераций соответственно. Амплитуды обучаются вблизи целевого значения и стаби-

лизируются после 50 итераций обучения. И (g) – обновление θ за 150 обучающих итераций. Градиент обновления θ уменьшается до 0, а θ стабилизируется в $[0, 2\pi]$.

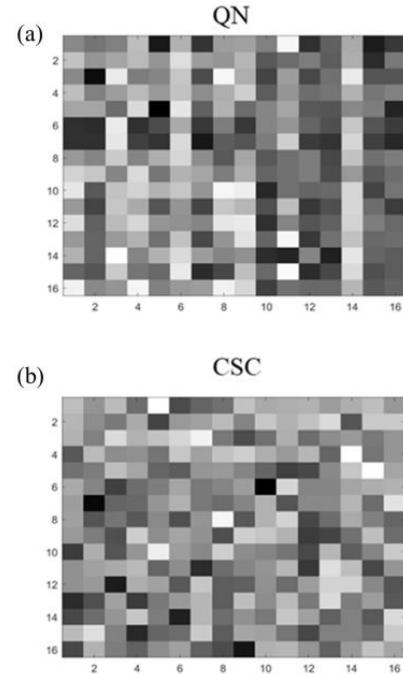


Рис. 4. Сравнительный анализ методов на основе QN и CSC. Сеть квантового сжатия UC на основе QN имеет размер 16x16. Словарь, установленный в алгоритме на основе CSC, имеет размер 16x16

В частности, в CSC можем использовать вектор разреженного кодирования [10] s и словарь D для выражения входного сигнала y , обозначаемого как $y = Ds$. Можем увидеть сравнение потерь обучения. Таким образом, наш алгоритм на основе QN в определенной степени имеет лучшее квантовое превосходство, чем алгоритм на основе CSC. Аналогично, по сравнению с другими квантовыми алгоритмами, преимущества предложенной нами структуры квантовой сети могут быть существенно отражены. На рис. 5 изображена разработанная модель квантового вычислительного устройства и результат выполнения квантового алгоритма преобразования набора пикселей. Данная программная разработка является offline десктопной вычислительной системой с открытой архитектурой, однако в дальнейшем планируется ее трансляция в online режим. Процесс измерения заключается в разыгрывании числа случайного характера из промежутка $[0, 1]$. При попадании значения в интервал $[0, |c_1|^2]$ выходным значением измерительного процесса является базисное состояние бра вектора 0, в противном случае (интервал $[|c_1|^2, 1]$) – квантовое состояние бра вектора 1.

В новейших квантовых компьютерных технологиях возможно хорошо контролировать и управлять только ограниченным числом кубитов. Тогда как, с другой стороны, реальная проблема оптического распознавания символов в квантовом методе опорных векторов требует десятки кубитов, что не может быть осуществлено в настоящее время. Таким образом, ограничим проблему случаем с минимальными затратами, в котором только два варианта («6» либо «9») находятся в списке и только

два свойства (горизонтальное либо вертикальное положение, определяемое в дальнейшем) составляют задачу. Это позволяет продемонстрировать данный алгоритм квантового искусственного интеллекта на основе 4-кубитного момента ядра квантового процессора при комнатной температуре.

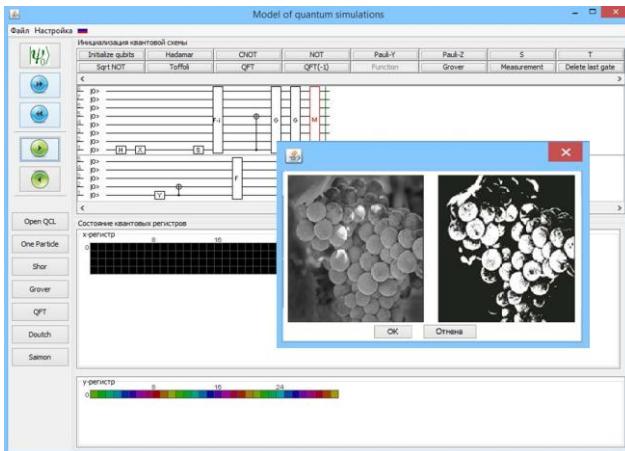


Рис. 5. Модель квантового вычислительного устройства

В разработанном алгоритме используются квантовые принципы, такие как суперпозиция квантовых состояний вычислительной системы, запутанность квантовых состояний и преобразование классического изображения в квантовое состояние путем кодирования цветовой палитры пиксельного набора в рамках комплексных амплитудных квантовых состояний.

Разработанная модель квантового вычислителя обладает рядом важных характеристик: модульность, библиотечный набор, исходное количество гейтов, возможность добавления гейтов, редуцированная матрица состояний, поддержка платформ Windows/Linux, редактор квантовой схемы, задание входных значение кубит, чистовой вывод вероятностей/амплитуд кубита, таблица цветов вероятностей/амплитуд состояний кубит, автоматический режим, пошаговый режим, моделирование физических процессов, матричное математическое ядро, нет ограничения на количество кубит, сохранение/загрузка программы/схемы/алгоритма, сохранение результатов вычислений, загрузка и продолжение вычислений, открытая архитектура, отработанные примеры, документация. Разработка архитектуры вычислителя подразумевает под собой разработку структуры программы, которая включает разбиение структуры на программные компоненты и разработку схемы взаимодействия между этими компонентами с помощью доступных снаружи свойств и методов этих компонентов.

Одним из самых продуктивных методов, направленных на увеличение функциональности модели, является дополнение модели вспомогательными внешними библиотеками и модулями. В состав внешних модулей и модулей входят:

1. OpenQCL. При нажатии на кнопку «OpenQCL» запускается форма для написания программ на квантовом языке программирования QCL (рис. 6).

```
C:\Windows\system32\cmd.exe
QCL Quantum Computation Language <32 qubits, seed 1428417371>
! Can't open default.qcl
! 0/321 1 | 10>
qc1> query x1f21
qc1> dump
STATE: z / 32 qubits allocated, 30 / 32 qubits free
1 | 10> qc1>
```

Рис. 6. Интерфейс QCL

2. OneParticle. Java-апплет, моделирующий квантовую механику, которая показывает поведение одной частицы в связанных состояниях в одном измерении. Он решает уравнение Шредингера и позволяет визуализировать решения. В верхней части апплета находится график потенциала, наряду с горизонтальными линиями, показывающими уровни энергии. По умолчанию это бесконечные прямоугольные ямы. Ниже находится распределение вероятностей положения частицы, колеблющейся назад и вперед в сочетании двух состояний. Ниже положения частицы – график ее движения. В нижней части экрана находится множество векторов, показывающих величину и фазу состояний.

3. Shor. Если нажать на одну из клавиш, расположенных в левом нижнем углу, то произойдет эмуляция соответствующего квантового алгоритма: Шора (рис. 7), Гровера, Саймона, Дойча или квантовое преобразование Фурье.

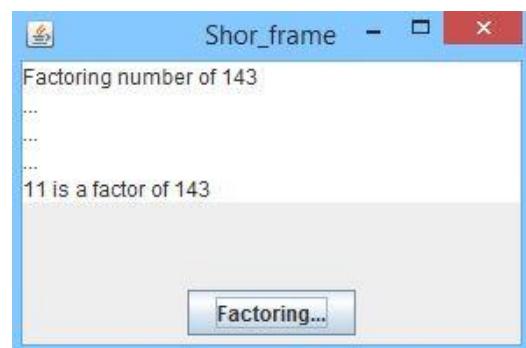


Рис. 7. Интерфейс модуля факторизации

Данный алгоритм опишем с помощью сети Петри (рис. 8) для более детального понимания работы МКВ в несколько этапов.

Характерной чертой каждого этапа является получения определенного объекта/группы объектов, задействованных на следующих этапах:

1. Выделение числа кубитов, создание регистра. Все начинается с кубитов, так как они являются единицей информации квантового вычислителя. Для начала работы необходимо определить количество кубитов/регистров.

2. Создание пустой квантовой схемы (КС). Выполняется инициализация КС, задание количества ветвей регистров.

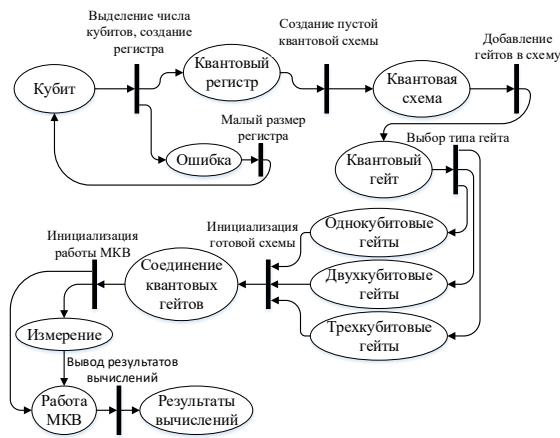


Рис. 8. Сеть Петри. Алгоритм работы модели

3. Добавление гейтов в КС. Пустая КС сама по себе ничего не выполняет, необходим набор гейтов. КС генерируется и обновляется автоматически, после добавления нового гейта в схему.

4. Выбор типа гейта. Базисом квантовой логики служит набор однокубитных, двухкубитных и трехкубитных гейтов.

5. Инициализация готовой схемы. На данном этапе происходит компоновка всех элементов КС для выполнения в модели.

6. Вывод результатов вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jones N.C., Whitfield J.D., McMahon P.L., Yung M.-H., Meter R.V., Aspuru-Guzik A., and Yamamoto Y. Faster quantum chemistry simulation on fault-tolerant quantum computers // New Journal of Physics. – 2012. – 14, 115023.
2. Shor P.W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer // SIAM J. Comput. – 1997. – 26, 1484.1509.
3. Harrow A.W., Hassidim A., and Lloyd S. Quantum algorithm for linear systems of equations // Phys. Rev. Lett. – 2009. – 103, 150502.
4. Shor P.W. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory // Phys. Rev. A. – 1995. – 52, R2493.
5. Gottesman D. Stabilizer codes and quantum error correction (California Institute of Technology, 1997).
6. Bernstein E., Vazirani U. Quantum complexity theory // In Proceedings of the 25th ACM Symposium on the Theory of Computing. – 1993. – P. 11-20.
7. Каиев Ф., Лафламм Р. Введение в квантовые вычисления [Текст]. – Москва; Ижевск: РХД, 2009. – 360 с.
8. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // 5th Computer Science On-line Conference 2016 (CSOS), Czech Republic, 2016. – P. 59-68.
9. Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M., Potapov V. Development of Methodology for Entangled Quantum Calculations Modeling in the Area of Quantum Algorithms // 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOS), Czech Republic, 2017. – P. 106-115.
10. Бронштейн И.Н., Семендаев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст]. – М.: Изд-во “Физматлит”, 1986. – 544 с.

Разработка программно-аппаратного комплекса для мониторинга наполнения мусорных контейнеров

Кутковой Владимир Сергеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kutkovoi@sfedu.ru

Елькин Дмитрий Максимович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
delkin@sfedu.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается разработка программно-аппаратного комплекса для мониторинга уровня наполнения мусорных контейнеров, с целью оптимизации процесса сбора твёрдых бытовых отходов. Основной задачей работы является проектирование, разработка и тестирование данной системы. В статье приведён обзор аналогов разрабатываемого продукта, выявлены достоинства и недостатки существующих решений. Описаны алгоритмы работы системы, стек используемых технологий, этапы разработки программно-аппаратного комплекса.

Abstract. In this work, we consider the development of a software and hardware complex for monitoring the level of filling of garbage containers, in order to optimize the process of collecting solid municipal waste. The main task of the work is the design, development and testing of this system. The article provides an overview of the analogues of the product being developed, and identifies the advantages and disadvantages of existing solutions. The stack of technologies used, the algorithms of the system, the stages of development of the hardware and software complex are described.

Ключевые слова: IoT, умный город, встраиваемые системы, STM32, ТБО.

Keywords: IoT, smart city, embedded systems, STM32.

I. ОБЗОР АНАЛОГОВ

Основной проблемой современных мегаполисов, а также средних и малых городов, является не своевременный вывоз твёрдых коммунальных отходов. Даже при условии добросовестного выполнения своих обязанностей мусороуборочными компаниями и регулярного вывоза отходов, жители постоянно наблюдают переполненные мусорные контейнеры. В одном районе плотность населения выше и контейнеры наполняются чаще, в другом реже.

Традиционно сбор мусора осуществляется коммунальными службами или подрядными организациями согласно расписанию по заранее утверждённому маршруту. Этот подход является малопродуктивным, поскольку подразумевает объезд всех площадок для сбора мусора независимо от фактического уровня наполненности контейнеров, что приводит к неэффективному использованию техники, повышенному расходу топлива, увеличению трудозатрат обслуживающего персонала. Система мониторинга наполненности контейнеров решает эту проблему. Она состоит из датчиков и информационной платформы. Датчики устанавливаются внутри контейнера и измеряют уровень наполненности бака.

После этого данные отправляются на сервер, где записываются в базу данных. Информационная система обрабатывает результаты и отображает их на мониторе диспетчера, а также позволяет построить оптимальный маршрут для вывоза ТБО (твердых бытовых отходов) и контролирует выполнение поставленной задачи.

На данный момент, на рынке IoT-устройств существуют подобные решения от компаний:

- «СмартСити» [1];
- DigiCity [2];
- GoodWAN [3].

После анализа аналогов были выявлены достоинства и недостатки готовых решений и разрабатываемого программно-аппаратного комплекса (ПАК). В табл. 1 проводится сравнение предлагаемого решения с существующими аналогами по выделенным критериям.

ТАБЛИЦА 1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛОГОВ

Критерий сравнения	Рассматриваемые ПАК			
	SmartCity	DigiCity	GoodWAN	TrashSensor
Технология передачи данных	NB IoT	NB IoT	LoRaWAN	NB IoT/LoRa WAN по выбору заказчика
Защита корпуса	IP68	IP65	IP68	IP53
Срок службы батареи	3 года	2-4 года	5 лет	5 лет
Наличие полнофункциональной информационной системы	Да	Да	Да	Нет
Наличие дополнительных датчиков	Нет	GPS, датчик температуры, акселерометр.	Нет	Датчик открытия дверей бокса, универсальный разъём для подключения любого датчика по интерфейсу UART/I2C
Возможность подключения ПАК в единую линию	Нет	Нет	Нет	Да

Разрабатываемый нами ПАК, не уступает по характеристикам аналогам. Его преимущества: наличие свободного интерфейса для подключения различных датчиков, выбор протокола передачи данных остаётся за пользователем, возможность подключения устройств в единую линию, что позволяет устанавливать передатчик только на мастер-устройстве, тем самым удешевляя слейв-устройства. Эта функция необходима на площадках с разделённым сбором мусора.

II. РАЗРАБОТКА ПАК

A. Аппаратная архитектура ПАК

В процессе работы над ПАК был определен его функционал:

- 1) Возможность передачи информации о наполненности мусорных контейнеров, состоянии дверей бокса, технические данные;
- 2) Возможность выбора типа передатчика NB IoT / LoRa;
- 3) Возможность установки устройства в бак любого объема;
- 4) Возможность подключения нескольких датчиков в одну сеть;
- 5) Возможность использования веб-интерфейса для отображения данных с датчиков.

Устройство спроектировано на базе микроконтроллера STM32G070CBT6 [4]. В состав датчика наполненности входят следующие блоки:

- 1) Модуль датчика ультразвука – необходим для измерения уровня наполненности мусорного контейнера;
- 2) Модуль управления питанием – необходим для повышения автономности ПАК при подключении устройств в общую линию.
- 3) Модуль контроля дверей бокса – пробуждает устройство для передачи данных оператору во время очистки мусорного бака;
- 4) Модуль связи – включает в себя модуль NB IoT или LoRa по выбору заказчика;
- 5) Модуль коммутации – служит для соединения датчиков в общую линию, а также включает защиту устройства от внешних воздействий.

Связь перечисленных выше модулей, можно увидеть на рис. 1.

Разработка схемы электрической принципиальной велась по блокам, которые были выделены при проектировании архитектуры аппаратного обеспечения. Для того, чтобы можно было начать работу с микроконтроллером ему необходима минимальная обвязка, в которую входит линия питания, а также дополнительные пассивные и активные электронные компоненты. Для прошивки STM32 был выведен разъём «SWD», и подключен к ножкам SWDIO, SWCLK, через резисторы 100 Ом, также добавлены контакты питания VCC, GND. Резисторы необходимы для защиты ножек контроллера.

Между контактами для прошивки должна быть подключена «земля», так как частота сигнала, идущего по ним, может достигать до 4 МГц.

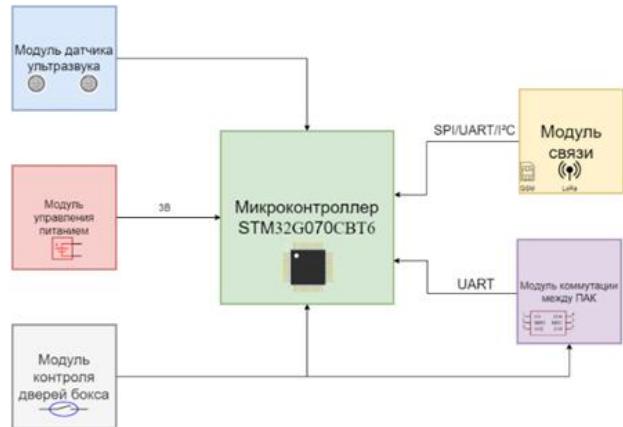


Рис. 1. Аппаратная архитектура

Дополнением схемы было использование разъёма USB Type-C для подключения контроллера к собственной модификации программатора ST-Link. Благодаря этому повысилось удобство подключения к устройству для его прошивки и отладки, вместо 4-х отдельно взятых проводов, достаточно использовать один разъём.

Для корректной работы в схему был добавлен фильтр входного питания. Также в ПАК присутствуют два светодиода, один для индикации питания, второй пользовательский. Для увеличения автономности работы конечного устройства, стандартно, светодиоды не устанавливаются на посадочные места. Также в схему добавлен геркон, который вводит устройство в сервисный режим, а к его ножке подключен конденсатор для устранения дребезга контактов.

Исходя из технического задания, устройства могут соединяться в общую линию для обмена данными, чтобы реализовать этот функционал использован интерфейс UART в полудуплексном режиме, т.к. скорость передачи данных из-за малых объёмов информации не важна, также преимущество данного подхода в том, что нужна лишь одна сигнальная линия, не считая общей земли. Мастер-устройство всегда должно идентифицировать слейв устройство, поэтому каждому подконтрольному датчику наполненности необходимо назначить адрес в топологии. Для ручной установки адреса, в схему добавлены три разъёма-перемычки, так как в линию могут объединяться до шести устройств. Дополнительно выведены контакты для сброса микроконтроллера.

Основу модуля ультразвука составляет операционный усилитель LM2902DR. Для его работы обеспечено стабильное входное питание с помощью конденсаторов маленькой и высокой ёмкости. Также для управления питанием этого модуля добавлены транзисторы. Так как основное преимущество ПАК – это автономность работы, использована связка полевых Р-канального и N-канального транзисторов для снижения потребляемого тока в режиме сна.

Задача операционного усилителя усилить отражённый сигнал с ультразвукового приёмника и согласовать со входом STM32. В свою очередь микроконтроллер при помощи таймера формирует выходной сигнал частотой 40 кГц, который усиливается транзисторами и подаётся на ультразвуковой передатчик.

Модуль управления питанием, как описывалось ранее, необходим для повышения автономности ПАК при подключении устройств в общую линию. В качестве элемента питания используется литиевая батарея типа D на 3,6 В ёмкостью 19000 мА*ч. Она применяется для питания электронных устройств, которые работают в сложных погодных условиях и которым требуется длительный автономный источник питания, её особенность – низкий ток отдачи. У каждого слейв-устройства есть такая батарея, это увеличивает общую автономность всего комплекса, однако подключать их параллельно, как, например, аккумуляторы, нельзя. Из-за малейшей разницы в напряжении батареи будут постоянно разряжать друг друга.

Принцип работы модуля питания заключается в следующем: в общую линию питания подключается батарея мастер-устройства, напряжение с батареи необходимо подать на ПАК, но только на мастер устройство, которое всегда имеет преимущество на получение энергии с этой линии, так как мастер устройство подаёт питание все слейв-устройства. Транзистор и перемычка на плате ПАК служат для выбора типа устройства, если это мастер-устройство, транзистор будет постоянно открытый, тем самым подавая питание на микроконтроллер, если это слейв-устройство, то сигнал на открытие транзистора будет подаваться с общей линии и подконтрольные устройства будут включаться, измерять наполненность, передавать информацию на мастер-устройство и выключаться. Информация, передаваемая между устройствами, содержит также уровень заряда батареи, чтобы при последующем включении всей цепочки, датчик с самым высоким напряжением отдавал свою энергию в общую линию для обеспечения работы всех устройств. Такая чередующаяся модель позволяет равномерно разряжать элементы питания. Для измерения напряжения, в схеме необходим делитель, он подключен через N-канальный транзистор, чтобы не расходовать заряд батареи.

Модуль открытия дверей бокса состоит из нескольких герконов, один для проверки состояния двери, другой для контроля закрытия её замка. Все сигналы от них подключены в общую линию, открытие двери любого мусорного бака означает, что главному устройству необходимо отправить информацию об этом оператору.

Модуль связи состоит из NB IoT-модуля [5] или LoRa-модуля [6] и транзисторов для их коммутации. Интерфейсы SPI и UART подключены к ножкам контроллера. Модуль коммутации между устройствами включает в себя диодную защиту для линий данных. Все сигналы, которые поступают на конкретное устройство от любых других, проходят через данный модуль. Это делается с целью защиты входов микроконтроллера от перегрузок по напряжению, так как на линию оказывает воздействие окружающая среда.

B. Проектирование и сборка ПАК

Для проектирования печатных плат была выбрана комплексная система автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств, разработанная австралийской компанией Altium – Altium Designer [7]. После трассировки печатной платы и проверки результатов, были сформированы выходные документы для отправки на производство. Результаты проектирования представлены на рис. 2.

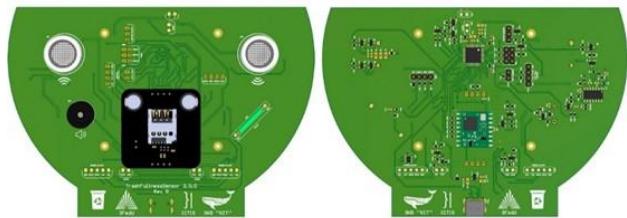


Рис. 2. Верхний и нижний слои печатной платы

Для размещения деталей на печатную плату использовалась машина для выполнения небольших серийных тиражей рабочих прототипов ZhengBang ZB3245TSS [8]. Предварительно на посадочные места компонентов была нанесена паяльная паста. По завершению работы станка, плата запекалась в инфракрасной паяльной печи.

C. Алгоритмы работы ПАК

Работа ПО ПАК начинается с инициализации микроконтроллера и подконтрольных ему устройств. С помощью регистра RCC_IOPENR включаем необходимые порты ввода-вывода, путём установки единиц в соответствующие биты согласно документации. GPIOx_MODER устанавливает режимы работы ножек МК, где x – группа портов (A, B, C, ...):

- 00: Режим ввода;
- 01: Режим вывода общего назначения;
- 10: Режим альтернативной функции;
- 11: Аналоговый режим.

GPIOx_PUPDR – регистр подтягивания порта к высокому или низкому уровню. Его можно использовать, когда необходимо подключать кнопки, программный I2C и многое другое, где необходима подтяжка.

- 00 – подтяжки нет;
- 01 – подтяжка к питанию;
- 10 – подтяжка к земле;
- 11 – зарезервировано (не используется).

При помощи GPIOx_BSRR осуществляется запись 0 или 1 в регистр вывода GPIOx_ODR для установки на выходе ножки МК логической единицы или нуля, например для управления светодиодом или транзисторным ключом. Для удобства работы была реализована функция void SetAltFunc(GPIO_TypeDef *port, int channel, int af), которая необходима для установки альт-функции для необходимого порта.

Для каждого устройства программа определяет его тип мастер или слейв. Слейв-устройства подключаются к мастер-устройству посредством проводной связи. Задача слейв-устройства при его включении определить свой адрес в топологии, собрать необходимые данные, а именно заряд батареи, наполненность мусорного контейнера, состояние двери и передать их мастер устройству. Адрес датчика определяется при помощи установки джамперов на этапе монтажа.

В каждой из модификаций датчик реализует общую логику работы и содержит системы питания и/или связи. Мастер-устройство в начале работы определяет тип пе-

редатчика, который будет использоваться для передачи данных, путём считывания 6-го бита регистра GPIOC_IDR. Процесс передачи может осуществляться с помощью цифровой NB IoT либо открытого стандарта маломощной радиосвязи LoRa. Обмен данными с SIM7020G осуществляется по USART4 со скоростью 115200 бод. Для включения интерфейса в регистре RCC_APBENR1 устанавливаем 1 в бит USART4EN. В USART4_BRR записываем значение

Чтение данных с интерфейса необходимо осуществлять по прерыванию. Для этого устанавливаем бит USART_CR1_RE в регистре USART4 CR1 и бит USART_CR1 UE для включение самого USART4. Функция обработки прерывания USART3_4_IRQHandler по произошедшему событию приёма данных записывает их из буфера в массив. Для работы с интерфейсом USART4 были реализованы следующие методы:

- Метод void USART4_Init(unsigned long baud) – инициализация USART4.
- Метод int USART4_Recv(char *data, int size, bool waitAll = false) – приём данных с USART4.
- Метод void USART4_Send(const char *data, int size) – передача данных по USART4.
- Метод void USART4_Send(const char *data) – передача данных по USART4.

Для работы с модулем SIM7020G был разработан парсер команд AT-протокола.

Синтаксис AT-команд:

- AT+КОМАНДА=?\r\n – после команды указаны знаки «=?». Данный синтаксис позволяет узнать какие параметры поддерживает команда. В ответ модуль вернёт строку с указанием количества параметров, поддерживаемых командой и диапазоном их значений.
- AT+КОМАНДА?\r\n – после команды указан знак «?». Данный синтаксис позволяет запросить текущие, действующие, значения.
- AT+КОМАНДА=ПАРАМЕТР(Ы)\r\n – после команды указан знак «=>» и параметр(ы). Данный синтаксис позволяет установить одно или несколько значений.
- AT+КОМАНДА\r\n - Команда отправлена без дополнительных знаков и параметров. Синтаксис установки/запроса данных, определяемых внутренними процессами модуля.
- Если синтаксис команды неверен, то возвращается ERROR.
- Если синтаксис команды верен, но допущены ошибки в параметрах, то возвращается +CME ERROR или +CMS ERROR.
- Если команда выполнена успешно, то в большинстве случаев возвращается OK.

Задача парсера получать на вход в виде строк, всё то, что приходит с интерфейса UART и далее обрабатывать данные в соответствие со стандартом. Программный код

работает на основе событийной модели. Главный модуль переключается между обработчиками в зависимости от категории входных данных. Заголовок команды, тело команда и ответ на команду. Для обработки данных с SIM7020G были реализованы следующие методы:

- Метод bool readHeader() – для чтения заголовков AT-команд.
- Метод bool readCreg() – для чтения заголовка CREG.
- Метод bool readHTTP() – для чтения заголовка CHTTPCREATE.
- Метод bool readStatus() – чтения запрашиваемого статуса.
- Метод bool error() – обработчик ошибки протокола.
- Метод bool result() – возвращает результат парсинга.

Через последовательный синхронный интерфейс SPI2 происходит обмен данными с Lora модулем RFM95. Настройка происходит через регистр SPI2_CR1, необходимо выбрать режим ведущего, самый значимый бит идёт первый, задать размер кадра 8 бит, включить программное управление ножкой SS, с помощью которой выбирается устройство для «общения». Битом SPI_CR1_SPE активируем интерфейс. Работа с интерфейсом осуществляется через методы:

- Метод void SPI2_Init() – инициализация SPI2.
- Метод uint8_t SPI2_Read() – приём данных с SPI2;
- Метод void SPI2_Write(uint8_t data) – передача данных по SPI2.

Программный модуль для работы с RFM95 содержит следующие функции:

- Метод int begin(long frequency) – инициализация LoRa-модуля.
- Метод void sleep() – перевод модуля в режим сна.
- Метод void idle() – вывода модуля из режима сна.
- Метод uint8_t readRegister(uint8_t address) – чтения данных с регистра модуля.
- Метод void writeRegister(uint8_t address, uint8_t value) – запись данных в регистр модуля.
- Метод uint8_t singleTransfer(uint8_t address, uint8_t value) – обмен данными с модулем по протоколу SPI.
- Метод void setFrequency(long frequency) – установки частоты передачи.
- Метод int beginPacket() – начало работы с пакетом данных, подготовка их к передаче;
- Метод void endPacket() – завершение работы с пакетом данных и передачи их по радиоканалу.
- Метод bool isTransmitting() – проверка состояния модуля: TX или RX.

- Метод `int write(const uint8_t *buffer, int size)` – передача данных LoRa-модулю для последующей отправки.
- Метод `void setTxPower(int level)` – установки мощности LoRa-модуля.
- Метод `void Lora_Init()` – включение, инициализации LoRa-модуля и SPI интерфеса.
- Метод `void Lora_Send(const char *str)` – передача данных через LoRa-модуль.
- Метод `int read()` – приём данных.
- Метод `int available()` – проверки доступных данных для приёма.
- Метод `int parsePacket()` – переводит модуль в режим приёма.

Модуль для работы с протоколом LoRaWAN содержит реализацию следующих функций:

- Метод `void Send_Data(unsigned char *data, unsigned char dataLen, unsigned int frameCounterTx)` – создаёт пакет LoRaWAN и отправляет его.
- Метод `void Encrypt_Payload(unsigned char *data, unsigned char dataLen, unsigned int frameCounter, unsigned char direction)` – шифрование передаваемых данных.
- Метод `void Calculate_MIC(unsigned char *data, unsigned char *finalMIC, unsigned char dataLen, unsigned int frameCounter, unsigned char direction)` – подсчёт кода целостности сообщения (Message Integrity Code).
- Метод `void AES_Calculate_Round_Key(unsigned char round, unsigned char *roundKey)` – подсчёта раундового ключа.

После процедуры инициализации и настройки периферии включаем все слэйв устройства при помощи цифрового порта MK GPIOB11 путём подачи на него высокого уровня. Мастер-устройство отправляет команду измерить данные для последующей передачи по соответствующему каналу связи. Данные между устройствами передаются по UART3 со скоростью 115200 бод, который работает в полудуплексном режиме. Для работы с интерфейсом UART3 были реализованы следующие методы:

- Метод `void UART3_Init(unsigned long baud)` – инициализация UART3.
- Метод `int UART3_Recv(char *data, int size, bool waitAll = false)` – приём данных с UART3.
- Метод `void UART3_Send(const char *data, int size, char addr = 0)` – передача данных по UART3

Измерение напряжения батареи на всех устройств происходит с помощью 9-го канала аналого-цифрового преобразователя ADC1. В регистре RCC_APBENR2 устанавливаем бит RCC_APBENR2_ADCEN для запуска периферии. Битом ADC_SMPR_SMP1 в ADC1_SMPR устанавливается количество тактов между выборками. Включается транзисторный ключ для подключения делителя. АЦП разрядностью 12-бит считывает значение

напряжения батареи. Часто в качестве опорного используется напряжение питания. При измерении напряжения питания всегда будет одно и то же значение, равное 0xFFFF (максимальное значение для 12-битного аналого-цифрового преобразователя), поскольку сигнал на входе АЦП будет равен опорному напряжению. Однако, в микроконтроллерах от ST есть свой собственный внутренний источник опорного напряжения. Напряжение с опорного источника питания на контроллере расположено на 13-ом канале ADC1. По формулам получаем напряжение батареи.

$$V_{refint} = \frac{V_{calib}}{4096} * 3000 \quad (1)$$

$$V_{max} = \frac{4096}{V_{int}} * V_{refint} \quad (2)$$

$$V_{div} = \frac{V_{bat}}{4096} * V_{max} \quad (3)$$

$$V_{res} = V_{div} * k, \quad (4)$$

где V_{calib} – значение опорного напряжения, измеренное для каждого контроллера во время производственных испытаний, которое хранится в памяти по адресу 0x1FFF75AA - 0x1FFF75AB,

V_{int} – значение измеренное на 13-ом канале АЦП,

V_{bat} – значение измеренное на 9-м канале АЦП,

k – коэффициент делителя (в нашем случае 2).

Мастер-устройство определяет какая батарея питания из подключенных будет использоваться для работы в следующем сеансе измерения и передачи данных и записывает номер устройства в память. Данный программный модуль содержит реализацию функции замера напряжения батареи устройства, путём измерения падения напряжения на резистивном делителе, модулем АЦП контроллера. Основная функция `int BatValue()` выполняет измерение уровня заряда и возвращает результат в милливольтах.

Для измерения уровня наполненности мусорного контейнера используется ультразвуковой датчик. При помощи таймера TIM1 формируется управляющий сигнал для подачи на излучатель. Задействуется бит RCC_APBENR2_TIM1EN в регистре RCC_APBENR2. В TIM1_PSC задается необходимый делитель.

Запускается отсчёт таймера битом TIM_CR1_CEN в TIM1_CR1. Регистр TIM1_CCMR3 настраивается так, чтобы таймер управлял выходами контроллера, также ножки должны быть переведены в режим альт-функции при помощи SetAltFunc(). Сигнал излучается передатчиком затем отражается от препятствия в баке и возвращается к приёмнику, измерив время прохождение сигнала, можно узнать процент заполненности контейнера относительно откалиброванных значений по формуле:

$$Fullness = \frac{(maxCalib - current) * 100}{maxCalib - minCalib} - 1, \quad (5)$$

где $maxCalib$ – время в относительных единицах прихода сигнала отраженного от дна бака,

`minCalib` – время в относительных единицах прихода сигнала отраженного от верха бака,

`current` – текущее время прихода отраженного сигнала, которое характеризует уровень заполненности бака.

Для более точного определения значения наполненности измерения проводятся 7 раз и фильтруются с помощью медианного фильтра [9]. Он используется для борьбы с импульсной помехой. Для случайной величины медиана определяется как значение, для которого одинаково вероятно, окажется ли случайная величина меньше или больше его. Поэтому большие, но маловероятные значения случайной величины практически не влияют на медиану.

После того как данные со всех подключенных устройств были собраны происходит их упаковка в соответствии со следующим форматом:

1. Сообщение о состоянии двери бокса: `SN.SR.DO.OR.ddddd.xxxxxxx\r\n` – где `ddddd` – id датчика, `x` – состояние двери (`x = 1` – дверь открыта, `x = 0` – дверь закрыта, `x` – устройство не подключено) порядковый номер `x`, соответствует номеру датчика, первый `x` это мастер – 1 устройство, второй `x` и далее это данные со слэйв, в соответствии с номером, если вместо номера – `x`, устройство не подключено;

2. Сообщение о состоянии наполненности контейнера: `SN.SR.FU.LL.ddddd.xxxxxxx.yy\r\n` – где `ddddd` – id датчика, `x` – процент наполненности 0- 0%, 1 - 10%, 2-20%, 3-30% и т.д. `f` – 100%, `e` – отсутствие контейнера, `yy` – заряд батареи в % (`ddddd`, `xx` и `yy` – в формате HEX) Например: `:SN.SR.FU.LL.ddddd.120fxxx.1e` – у датчика `ddddd` наполненность в первом контейнере(мастере) 10%, во втором контейнере 20%, в третьем контейнере 0%, в четвертом контейнере 100%, пятый, шестой и седьмой – не подключены. Заряд батареи 30%.

Основные методы для упаковки данных:

- Метод `void intToStrHex(long long int num, char *buf, int bufLen)` – преобразования числа в строку в 16CC.
- Метод `void strToBinary(const char *str, char *buf, int bufLen)` – преобразования строки в бинарное представление.

Далее происходит передача информации на сервер. Затем главное устройство отключает все слэйв устройства, для этого на цифровом порту MK GPIOB11 формируется низкий уровень и переходит в режим глубокого сна, для сохранения заряда батареи. Тип передаваемых данных зависит от события, по которому мастер вышел из режима сна. Основные методы для передачи данных на сервер:

- Метод `void sendDoorData(trashDataStruct *info, void (*sender)(const char *str))` – отправка данных о состоянии дверей.
- Метод `void sendFullData(trashDataStruct *info, void (*sender)(const char *str))` – отправка данных о наполненности мусорных контейнеров.

Пробуждение раз в определенный промежуток времени реализовано через модуль часов реального времени RTC, который в определенный промежуток времени генерирует прерывание, тем самым возобновляет работу контроллера.

Задействуем биты `RCC_APBENR1_RTCAPBEN` и `RCC_APBENR1_PWREN` в регистре `RCC_APBENR1` для включения внутренних часов. Регистры RTC защищены от несанкционированного доступа на запись, чтобы их разблокировать, необходимо записать сначала `0xCA`, затем `0x53` в регистр `RTC_WPR`. Ввод неправильных значений повторно активирует защиту от записи. Для работы счётчика таймера пробуждения в периоде от 1 секунды до 18 часов, устанавливаем бит `RTC_CR_WUCKSEL_2` в регистре `RTC_CR`. Необходимое время выхода из сна записываем в `RTC_WUTR`.

Уменьшить потребление МК можно несколькими способами, самый простой – это понизить его тактовую частоту или отключать шины APB и AHB, когда они не используются. Другой вариант, использовать один из режимов низкого энергопотребления, их всего три:

- Sleep-режим;
- Stop-режим;
- Standby-режим.

Для нашего ПАК будем использовать Standby-режим, он характеризуется самым низким потреблением, около 2 мА и потерей всех данных, то есть при выходе из этого режима контроллер будет вести себя так же, как при нажатии на кнопку Reset. Вход в этот режим осуществляется с помощью инструкций WFE и WFI, когда:

- установлен бит `SLEEPDEEP`;
- установлены биты `PWR_CR1_LPMS_0` и `PWR_CR1_LPMS_1` в регистре `PWR_CR1`;
- сброшен бит `WUF`, в регистре `PWR_CSR`.

При открытии любой из дверей датчик выходит из режима сна и отправляет информацию о состоянии дверей бокса на базовую станцию. Основные методы для работы с режимом сна:

- Метод `void RTC_Init()` – содержит функции для работы с регистрами бэкапа, часами реального времени и режимом сна.
- Метод `void SysTick_Handler()` – обработчик прерывания при пробуждении с обычного сна.
- Метод `void RTC_TAMP_IRQHandler()` – обработчик прерывания при пробуждении с глубокого сна (Deep sleep).

В датчике реализованы три режима работы:

- режим сканирования;
- режим калибровки;
- режим прошивки.

В режиме сканирования данные с датчика наполнения поступают в систему мониторинга через заданные промежутки времени (один раз в час).

Режим калибровки датчика активируется с помощью геркона, расположенного в корпусе устройства. Когда в бокс устанавливается пустой контейнер, к геркону подносится магнит для записи в память устройства значений его наполненности. Успешность записи подтверждается

звуковым откликом датчика. Далее на уровень верхней части контейнера подставляется специальная плоскость, затем к геркону подносится магнит и устройство записывает текущую информацию. Успешность записи подтверждается звуковым откликом датчика.

Работа в режиме прошивки предусматривает замену программного обеспечения устройства с помощью программатора посредством подключения к контактам, находящимся внутри корпуса.

D. Программная архитектура ПАК

Для разработки программного обеспечения ПАК была выбрана многофункциональная среда разработки приложений на языках C, C++ и ассемблере для целого ряда микроконтроллеров от различных производителей – IAR Embedded Workbench. В прошивке ПАК были реализованы программные модули для работы с периферией микроконтроллера, разработан AT-парсер для работы с модулем SIM7020G, код для работы с протоколом LoRaWAN [10], а также написана основная логика работы устройства. Архитектура программного обеспечения датчика наполненности представлена на рис. 3.

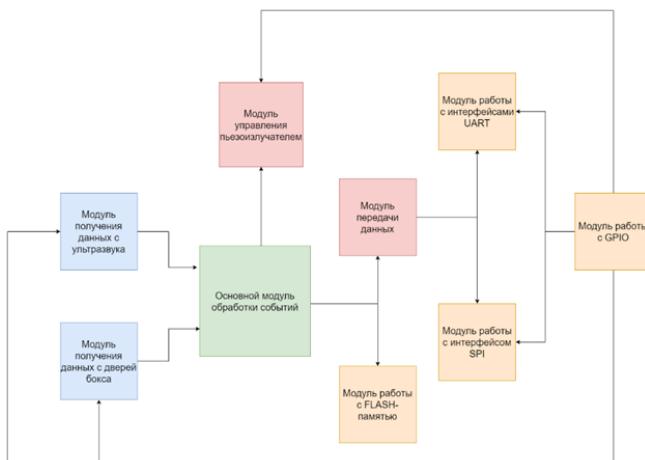


Рис. 3. Программная архитектура

Для визуализации данных, поступающих с датчиков, был разработан простой веб-интерфейс с использованием библиотеки React [11] для frontend-части и фреймворка Express с библиотекой Sequelize для backend-части. Для хранения данных используется база данных PostgreSQL, которая содержит две таблицы «Sensor» и «Data». На рис. 4 представлена общая схема работы датчика.

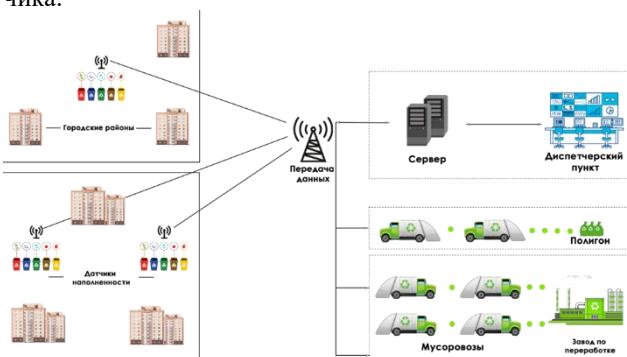


Рис. 4. Структурная схема работы датчика

На веб-сайте в виде таблицы отображается список датчиков с указанием их адреса, GPS-координат, уровня наполненности бака, заряда батареи, а также время последнего обновления данных. Справа расположена карта с отображением всех датчиков и информацией, получаемой с них. Прототип интерфейса информационной системы представлен на рис. 5.

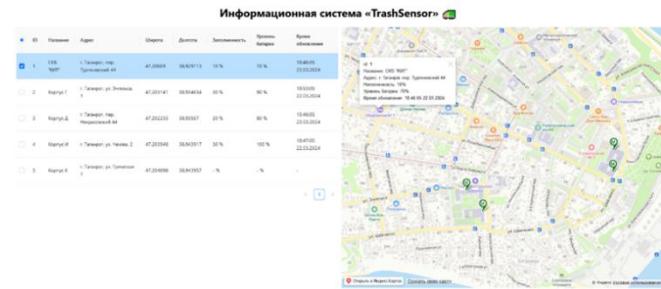


Рис. 5. Прототип интерфейса информационной системы

III. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Для вычисления суммарных финансовых затрат на разработку программного продукта были использованы такие показатели как:

- материальные затраты (Змат);
- затраты на оплату труда (Зт);
- затраты на оплату услуг, выполненных сторонними организациями (Зстоп);
- отчисления на социальные выплаты (Зсоц);

Для расчета суммарных затрат на проектирование и разработку программного продукта была использована формула ниже:

$$Z = Z_{\text{мат}} + Z_t + Z_{\text{стоп}} + Z_{\text{соц}}. \quad (6)$$

Итоговые затраты по каждой статье представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. РАСЧЕТ ОБЩИХ ЗАТРАТ НА РАЗРАБОТКУ

Статьи затрат	Сумма, руб
Оплата труда	566 822, 40
Материальные расходы	19 300
Затраты на оплату услуг, выполненных сторонними организациями	14 676, 30
Страховые взносы	192 153
Итого	792 951,7

Таким образом, общие затраты на разработку и создание ПАК и его тестирование составляют порядка 800 тысяч рублей.

Реализованный проект может считаться коммерческим. Монетизация будет заключаться в продаже датчиков наполненности, также при условии доработки информационной системы, подписки на сервис. На рис. 6 представлена разработанная бизнес-модель Остервальдера [12].



Рис. 6. Бизнес-модель Остервальдера

Так как разработанный ПАК является универсальным передающим устройством и с лёгкостью внедряется в систему умного города, то поиск потенциальных покупателей можно осуществлять и среди компаний, которые занимаются улучшением городской среды, путём внедрения устройств интернета вещей. Стоимость одного датчика наполненности мусорного контейнера установим в размере 15 тысяч рублей. Продажа ПАК будет происходить в течение периода времени. Таким образом, чтобы окупить затраты на разработку необходимо продать 54 датчика. В среднем городской микрорайон включает в себя не менее 10 мусорных площадок, на каждой из которых от 4 до 6 контейнеров с разделённым сбором отходов. Соответственно для его автоматизации необходимо не менее 50 датчиков. Управляющая компания обслуживает сразу несколько микрорайонов, отсюда следует, что при заключении договора с одной такой компанией проект окупит себя полностью.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время работы над проектом был проведён обзор аналогов существующих решений, выявлены их положительные и отрицательные стороны. Исследованы современные протоколы передачи данных для IoT-устройств.

В результате разработан программно-аппаратный комплекс для мониторинга наполнения мусорных контейнеров и оптимизации вывоза ТКО.

В дальнейшем система будет дорабатываться и коммерциализироваться. Будет разработана полнофункциональная информационная система, которая должна обрабатывать данные с датчиков, собирать статистику, рекомендовать оптимальный маршрут для вывоза ТБО, прогнозировать уровень заполненности контейнеров и другие функции, которые помогут компаниям, осуществляющим вывоз ТБО, оптимизировать бизнес-процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Датчик наполненности мусорного контейнера [Электронный ресурс]. – URL: <https://smartcitywaste.ru/>.
2. Датчик уровня наполненности: [Электронный ресурс]. – URL: <https://digicity.io/sensor/>.
3. Датчик наполненности мусорного бака [Электронный ресурс]. – URL: https://goodwan.ru/waste_sensor?ysclid=lu4a3y4fv0204172130.
4. STM32G070CB - Mainstream Value line: [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g070cb.html>.
5. Routray S.K. Narrowband Internet of Things // Encyclopedia of Information Science and Technology, Fifth Edition. – IGI Global, 2021. – С. 913-923.
6. RFM95/96/97/98: [Электронный ресурс]. – URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/8/0/4/RFM95_96_97_98W.pdf.
7. Документация Altium Designer: [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.altium.com/ru/documentation/altium-designer/>.
8. Микроэлектроника, взгляд изнутри: автоматическая машина для сборки и размещения Zheng Bang ZB3245TSS [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/mvideo/articles/666824/>.
9. Фильтрация шума сигнала [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/588270/>.
10. Кутковой В.С. Использование LoRaWAN в устройствах интернета вещей. Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2023): Сборник трудов XIX Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Таганрог, 23-25 ноября 2023 г.). – Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2023. – С. 216-220.
11. React. The library for web and native user interfaces [Электронный ресурс]. – URL: <https://react.dev/learn>.
12. Бизнес-модель Остервальдера: что это такое? [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/productstar/articles/508926>.

Обзор методов выявления экспертных знаний для решения задач ситуационного анализа в ГИС

Исаев Александр Викторович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
alis@sfedu.ru

Аннотация. СITUационный анализ представляет собой процесс оценивания внешних и внутренних факторов с целью определения рационального принятия решений. Одним из инструментов для анализа ситуаций и принятия решений является применение пространственных данных и геоинформационных систем (ГИС). Задачей ситуационного анализа в рамках ГИС является выработка достоверного решения для некоторой проблемной ситуации [1]. Решение проблемных ситуаций основано на знаниях экспертов предметной области, которые имеют большой опыт решения аналогичных задач. Сложность разработки подобных ГИС заключается в методе выявления экспертных знаний и их повторном применении при решении пространственных задач. В статье рассматриваются известные модели представления знаний, сложность выявления неявных знаний и известные подходы выявления экспертного знания.

Abstract. Situation analysis is the process of evaluating external and internal factors to determine rational decision making. One of the tools for situation analysis and decision making is the use of spatial data and geographic information systems (GIS). The task of situational analysis within GIS is to develop a valid solution for some problem situation [1]. The solution of problem situations is based on the knowledge of subject matter experts who have extensive experience in solving similar problems. The complexity of developing such GIS lies in the method of identifying expert knowledge and its reapplication in solving spatial problems. The paper discusses known models of knowledge representation, the complexity of identifying tacit knowledge and known approaches for identifying expert knowledge.

Ключевые слова: ситуационный анализ, выявление экспертных знаний, неявное знание, геоинформационные системы, модели представления знаний.

Keyword: situation analysis, expert knowledge elicitation, tacit knowledge, geographic information systems, knowledge representation models.

I. ВВЕДЕНИЕ

В постоянно меняющемся мире выявление экспертных знаний является важной задачей в различных областях. Экспертом в предметной области называют высококвалифицированного специалиста, который приобрёл специальные навыки или знания по конкретному предмету посредством профессиональной подготовки и практическому опыту. Экспертная система – компьютерная

программа, использующая искусственный интеллект (ИИ) для воспроизведения суждений человека, обладающего экспертными знаниями в определенной области. Экспертная система сохраняет опыт людей в базе знаний. Такая система пытается действовать как эксперт-человек в предметной области. Данные в базу знаний добавляются людьми, которые являются экспертами в определенной области, а экспертная система используется пользователем, не являющимся экспертом, для получения информации.

Выявление экспертных знаний является важным вопросом в программных приложениях, использующих карту и знания о ранее известных прецедентах. С каждым годом растёт число ГИС поддержки принятия решений на основе экспертных знаний. Поиск экспертных знаний в ГИС является жизненно важной темой, поскольку использование знаний наиболее квалифицированных экспертов в системе имеют значительные экономические последствия. Для выявления экспертных знаний используется как ручной, так и автоматизированный подходы в различных областях применения, например, в медицине [2], предпринимательстве [3] и различных научных исследованиях [4].

II. МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Методы представления знаний оказывают существенное влияние на характеристики и свойства разрабатываемой экспертной системы. Поэтому представление знаний является одной из наиболее важных проблем, характерных для систем, основанных на знаниях. Существуют множество моделей представления знаний для различных предметных областей. Основные модели представления знаний: семантические сети, фреймовые модели (фреймы), правила продукций, формальные логические модели [5].

Использование знаний геоинформационными моделями – это один из путей их интеллектуализации. В настоящее время существует набор апробированных и изученных моделей представления знаний, их достоинство в универсальности. Независимо от содержания интеллектуальная система с помощью модели знаний может манипулировать этими знаниями в информационном смысле: накапливать, хранить, модифицировать, передавать и так далее. Особенностью этих моделей является отсутствие прямой связи со смыслом того, чем наполнена прикладная область. Возможности манипулирования не ог-

раничены, но смысловое использование должна диктовать логика прикладной области. Для геоинформационных моделей характерно наличие содержательных знаний о пространстве и времени. Эти знания описываются картографическими объектами и отношениями. Уже на основе этих знаний могут успешно решаться задачи, связанные, например, с разумным принятием решений.

В системе **продукций** с обратными выводами с помощью правил строится дерево «И/ИЛИ», связывающее в единое целое факты (посылки) и доказываемое (опровергаемое) утверждение; оценка этого дерева на основании фактов, имеющихся в базе данных, и есть логический вывод. Оценка заключается в том, что необходимо найти ту посылку, наличие или отсутствие которой в наибольшей степени подтвердит или опровергнет рассматриваемое утверждение. Прямой вывод: известна посылка, нужно получить результат. Основополагающими являются системы продукции с прямыми выводами.

На рис. Рис. 1 представлены зоны применимости правил продукции: зелёная ($B \wedge C \wedge D$), жёлтая ($C \wedge D \wedge E \wedge F$) и синяя ($A \wedge C$).

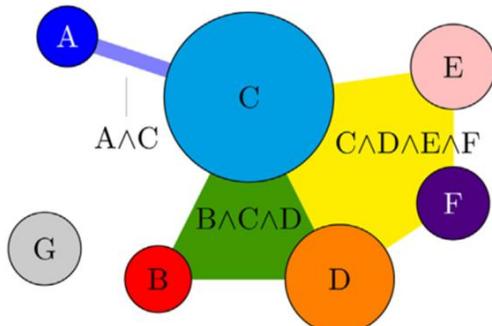


Рис. 1. Схематическое представление правил продукции

Одна из разновидностей интеллектуальной деятельности – анализ и синтез понятий, позволяющих контролировать в геоинформационных моделях смысл предметов и явлений. **Семантическая сеть** представляется множеством сущностей и отношений между ними. Зависимость от контекста для семантических сетей играет особую роль в силу того, что, изменяя и контролируя контекст, интеллектуальная система получает способность генерировать «неожиданные» варианты решений. ГИС обладает большой фактографической базой, с помощью которой могут обосновываться любые гипотезы. Прямой вывод в семантической сети предполагает нахождение заданного фрагмента понятий и отношений. Если такой фрагмент найден, то суждение соответствует знаниям о предметной области. Если не подтверждено наличие такого фрагмента, говорить о неверности суждения нельзя. Причиной может быть неполнота самой семантической сети. При обратном выводе задаются отдельные понятия и отношения. Требуется найти какой-либо фрагмент, который связывает заданное. Правила продукции можно преобразовать в семантическую сеть, а семантическую сеть можно оформить в виде правил продукции. Привязка семантической сети к области на карте даёт различную интерпретацию знаний. На полноту, непротиворечивость и избыточность знаний влияют зоны действия (полигонов) областей привязки знаний и положения рабочей области анализа. В зависимости от их расположения качество работы интеллектуальной системы может существенно различаться.

На рис. Рис. 2 представлен пример семантической сети для дорожной развязки на карте.

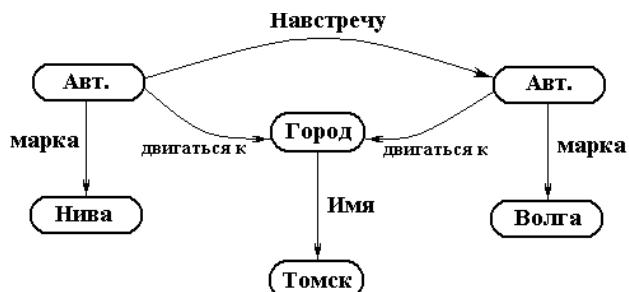


Рис. 2. Пример семантической сети

Онтологии – способ описания знаний, который соответствует семантическим сетям. Любая онтология имеет обязательно конкретную интерпретацию и в геоинформационных моделях привязана к области карты.

Фреймы используются для представления знаний о стереотипных ситуациях. Стереотипными называются ситуации достаточно обобщенного характера, но не лишенные важных смысловых деталей. Между фреймами так же, как и в семантических сетях, устанавливаются отношения. Особенность описания отношения в том, что оно также может быть фреймом. Моделирование разумных реакций на возникающие пространственные ситуации можно считать одним из наиболее актуальных вариантов применения фреймовых моделей. Традиционно фреймовые модели использовались для представления стереотипных ситуаций. Знания в этом случае используются для такой организации поведения интеллектуальных агентов, которое основано на сопоставлении текущего состояния с одной или несколькими известными ситуациями. Ситуация предполагает не только идентификацию положения в пространстве состояний, но и выработку решений, рассматриваемых также как стереотипные ситуации. Для геоинформационных моделей в качестве пространства состояний рассматривается пространство географической карты и связанное с ней пространство информационных ресурсов. Фреймы таким образом отражают знания о событиях, явлениях и объектах реального мира. На рис. 3 представлен пример структуры фрейма.

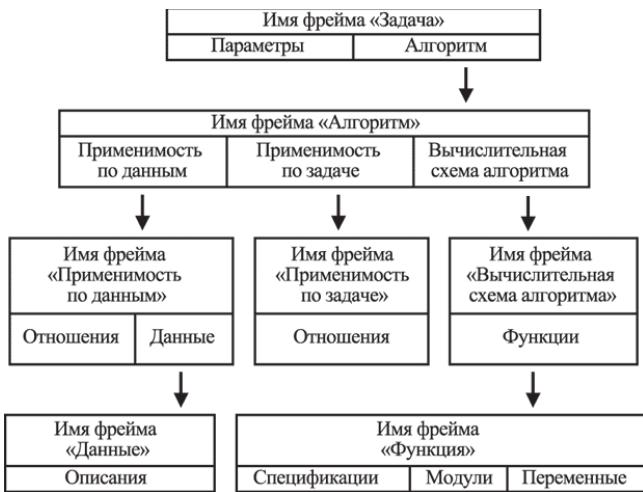


Рис. 3. Структура фрейма «Задача вычислительного типа»

Однако данные модели обладают рядом недостатков, которые не позволяют их эффективно применять к заданной задаче. В этих моделях представления знаний не достаёт пространственной информации, которая есть в картографических представлениях.

III. ПРОБЛЕМЫ ПРИОБРЕТЕНИЯ ЗНАНИЙ

Методы получения знаний и построения экспертных систем кажутся простыми и легкими в применении. Но при работе с передачей знаний возникает множество проблем. Приобретение знаний является узким местом построения экспертных систем. Человеческое знание можно рассматривать как запутанную массу информации. В процессе приобретения знаний инженер знаний должен попытаться овладеть человеческими знаниями и привести их в соответствующие режимы в экспертной системе. Отсюда следуют проблемы процесса приобретения знаний.

Самая фундаментальная трудность заключается в несоответствии между человеческими и машинными знаниями. Прежде всего существует несоответствие между организацией знаний. Человеческие знания хранятся неизвестным на данный момент способом. Наиболее часто используемой гипотезой является идея ментальных моделей. Использование знаний – это человека не сознательный процесс для извлечения и применения фактов и правил, а неосознанное приобщение к объектам и положениям вещей. Аналогия между ментальной моделью и реальным положением дел дает решение о том, какие знания следует применять. В этом процессе «применения» знаний нет необходимости их вербализовать. Говоря об эксперте, «знающем» свою область, мы говорим о чем-то расплывчатом. Знания проявляются только в поведении этого эксперта, но логика или оправдание его действий не показаны. Применяемые правила также остаются непрекрытыми. В данном случае нужна материализация знаний, то есть их представление. Только в представлении можно передавать и понимать знания, ими можно манипулировать. Верbalное представление является хорошим решением. По сути, это наиболее часто используемый вид репрезентации в человеческом общении. Однако возникает препятствие, когда дело доходит до вербализации знания во всех его деталях.

Несоответствие представления. Эксперту редко приходится излагать свои знания неспециалистам. При обмене знаниями между экспертами предполагается наличие большого количества информации. Это не только общие знания о мире, но и знания о конкретной области, такие как словарный запас, концепции, общие правила. Даже в ситуации обмена знаниями при обучении уже предполагается значительная часть знаний. В процессе приобретения знаний, когда экспертные знания необходимо перенести в систему, не содержащую никаких знаний, эксперт в предметной области сталкивается с большими трудностями, когда ему приходится вербализовать свои знания.

С другой стороны, экспертная система использует также систему представления знаний. Чаще всего используются представления в виде фреймов для декларативных знаний и правила продукции для процедурных знаний. Существенным является формальный способ этих форм представления. На стороне экспертной системы знания представлены фреймами и продукционными

правилами, написанными на языках программирования. Эту несовместимость между человеком и машиной можно назвать репрезентативным несоответствием.

Несоответствие полноты. Невное знание – знание, которое вообще невозможно представить, вызывает ещё одну трудность. Человек-эксперт не осознает всех знаний, которыми он обладает. Только когда его об этом прямо спрашивают или когда он занимается определенной областью своих знаний, он может вербализовать это знание. Экспертной системе требуются все необходимые знания для решения задач, для которых она будет построена. Этот разрыв между экспертом и системой есть несоответствие полноты.

Несоответствие категории. Очевидное, но менее упоминаемое различие – это несоответствие между человеком и машиной как двумя совершенно разными системами. Речь идет не о таких аспектах, как различие в представлении, а об интегрированной системе человека как решателя проблем в сравнении с экспертной системой. Общий подход настолько разный, что сравнение аспектов кажется бесполезным. Эти различия более глубокие, чем различия между языками программирования, между фреймами и скриптами или между знаниями эксперта А и эксперта Б в конкретной области. Система обработки информации человеком относится к другой категории, чем машинная обработка информации. Мы можем назвать это несоответствием категорий. Четыре несоответствия, описанные выше, возвращают на другой конец экспертной системы: интерфейс с конечным пользователем. Для людей это меньшее препятствие для понимания результатов работы компьютерной системы. Однако некоторые трудности в понимании остаются. Экспертные системы с лучшим дизайном имеют средства объяснения, чтобы убедить пользователя в обоснованности своих рассуждений. Однако стоит упомянуть, что это не столько проблема приобретения знаний, сколько проблема проектирования экспертных систем. Из этого краткого анализа человеческих и машинных знаний можно сделать два вывода. Во-первых, в процессе приобретения знаний мы должны постоянно осознавать несоответствие подходов между человеком и машиной. Во-вторых, приобретение знаний – это не часть построения экспертной системы, а интегрированный аспект всего процесса разработки знаний и построению экспертной системы [6].

IV. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ

Знания можно классифицировать на явные и неявные знания [7].

Явное знание имеет универсальный характер, оно наглядно и может использоваться в различных контекстах, оно доступно на сознательном уровне и основано на рациональном, конвергентном и логическом мышлении. В результате оно передаётся через слова, предложения и фразы и сохраняется на организационном уровне в документах, отчётах, процедурах и правилах. Явное знание наиболее полезно, когда аналитику ГИС приходится работать с организованными и предсказуемыми ситуациями [8].

Неявное знание носит личный характер, менее заметно и его трудно формализовать. Оно отражает взгляды, интуицию, ценности, убеждения и догадки людей и

детализируется в их действиях, опытае, идеях и эмоциях [7]. Оно доступно на бессознательном уровне и представляет собой результат творческого мышления. В результате неявное знание распространяется через межличностное взаимодействие и может сохраняться как часть организационной культуры. Это важно в непредсказуемых и неорганизованных обстоятельствах, требующих инновационных решений.

Выявление явных знаний. Явные знания имеют формальную математическую запись, которая может быть как простой, например, числовые меры (среднее значение, дисперсия), так и сложной, как аналитические выражения в свободной форме, связывающие несколько переменных. Такая запись исключает субъективность её интерпретации. Более того, фиксированное математическое понятие позволяет алгоритмически обрабатывать знания. Для формализации знаний помимо статистических описательных мер также применяются методы интеллектуального анализа данных и машинного обучения.

Для передачи экспертных знаний могут применяться **правила продукции** – формы вида «ЕСЛИ-ТО», востребованы из-за простоты их интерпретации. Их можно получить путём интеллектуального анализа правил ассоциации. Также используется более простой подход к созданию правил продукции – использование деревьев решений, которые могут принимать форму деревьев классификации [9]. Явное знание может принимать форму аналитических отношений между различными переменными. Из-за нелинейного взаимодействия переменных полученные знания иногда бывает трудно интерпретировать.

Выявление неявных знаний. Неявные знания не имеют предопределенных обозначений и часто представляются визуально. Интерпретация таких знаний может быть субъективной, но все же поддерживать процесс принятия решений аналогично методам визуализации. Двумя наиболее распространенными формами визуального неявного знания являются кластеры и двумерные проекции.

Проблема неявного знания часто не осознается исследователями. Существует различие между неявным знанием, которое когда-то было представлено явно или декларативно, и неявным знанием, которое возникает в результате процесса неявного обучения и никогда ранее не было представлено явно. В первом виде явного знания декларативное знание трансформируется в процедурную форму. Через некоторое время эксперт теряет способность сообщать об этом устно. Второй вид неявного знания – это знание, накопленное опытом и никогда не verbalизованное [10].

V. Способы выявления экспертных знаний

Важным элементом при выявлении экспертных знаний является **контекст ситуации**, представленной картографически. В [11] авторы делают акцент на том, что при выявлении знаний эксперту должна быть представлена определённая степень контекста проблемы. Авторы связывают контекст проблемы с параметрами поиска, используя для этого ключевые слова, а также специальные фильтры структурированных полей, чтобы сфокусировать диапазон возвращаемых результатов. Структурированные фильтры обеспечили небольшую степень вы-

бора и фокусировки отношений. После получения результатов поиска параметры оставались на виду, что помогало вспомнить контекст проблемы. В статье описывается разработка веб-интерфейса, в котором эксперт мог определить количество решений для конкретной категории опыта (или человека), просмотрев количество связанных прецедентов. Затем аналитик мог выбрать прецедент и просмотреть материалы, имеющие отношение к поиску. Любые нежелательные категории опыта (или людей) разрешалось удалить, чтобы сфокусировать набор результатов. Таким образом, разработанная система позволяла рассмотреть отношения: таблицу совпадений, близость опыта, близость знаний экспертов в контексте задачи и сетевую диаграмму.

В работе [12] исследователи рассматривают ARMAX-модель для выявления процедурных знаний, а стратегия проб и ошибок применяется для выявления эвристических знаний. Предлагаемая система состоит из смешанной базы знаний, включающей объектно-ориентированное представление, правила продукции и нечеткие функции, что позволило реализовать комплекс знаний о проблемной ситуации, включая теоретические знания, а также эвристические экспертные знания. Выделенные метазнания управляют общим протоколом поиска, подразумевающим несколько итераций методом проб и ошибок, а также принятие решения в отношении окончательного решения.

Передачу знаний можно рассматривать с разных сторон. Некоторые исследователи придерживаются социального подхода [13] и представляют знания как метафору, способную включать в себя организованный набор фактов, идей и опыта, которыми систематически делятся с другими посредством использования общей коммуникационной среды. Другие поддерживают технологический подход [13] и утверждают, что знания определяют контекстуальную информацию, которая обрабатывается и передается с помощью информационных технологий. В первом случае подчеркивается человеческий характер знания, во втором – абстрактное измерение. Однако необходимо принимать во внимание как абстрактные, так и субъективные измерения, поскольку знание представляет собой сложную модель мышления, чувств и поведения, разработанную путём пропускания контекстуальной информации через внутренний, личностный фильтр.

В работе [14] предлагается решение задачи выявления предпочтений у эксперта с использованием апостериорного метода. Разработанная система поддержки принятия решений позволяет интерактивно обнаруживать и визуализировать экспертные знания. Основные особенности этой системы заключаются в том, что эксперт может визуализировать решения из многомерных целевых пространств в двумерной проекции. Данный подход может быть легко адаптирован для ГИС, поскольку карта представляет собой 2D-проекцию земной поверхности. В предлагаемом подходе используется три метода: визуализация радиальных координат, метод нелинейной многомерной визуализации и распределённое стохастическое встраивание соседей (метод уменьшения размерности). Эти методы дополняют диаграммы рассеивания и графики параллельных координат, которые также реализованы в системе.

На рис. 4 представлена 2D-проекция многомерного целевого пространства в двумерной проекции.

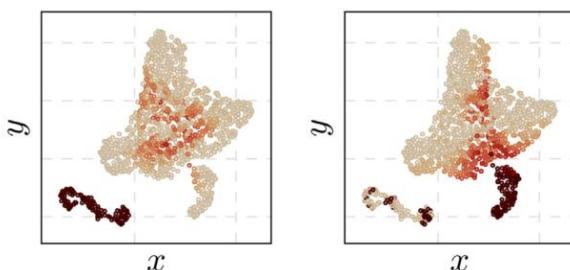


Рис. 4. Двумерные проекции, отображенные цветом в UMAP

Методы кластеризации позволяют находить в многомерных данных скрытые структуры, которые нелегко обнаружить с помощью обычных методов визуализации [14]. Машинное обучение направлено на уменьшение размерности данных путём поиска проекций меньшей размерности, сохраняющих глобальную структуру данных. Такие методы получили широкое распространение в сообществе машинного обучения.

В [15] описывается разработка самоорганизующихся карт, направленная на максимальное сохранение топологии многомерных данных в двумерных проекциях.

Для визуализации решений в пространстве решений на картографической проекции могут использоваться генеративные топологические карты [16].

В [17] авторы использовали многокритериальную оптимизацию для построения своей модели принятия решений с использованием подхода моделирования. Однако количественная и качественная информация, предоставленная экспертами, имеет такие недостатки как субъективность, неопределенность и отсутствие адаптируемости из-за уровня знаний. Все эти недостатки в сочетании с неточностью многомерных данных из-за различных факторов делают метод анализа иерархии слабым методом, предоставляющим неполную карту для решения задачи ситуационного анализа.

Экспертные системы можно разделить на два поколения. Экспертные системы **первого поколения** основаны на использовании поверхностных знаний, таких как ассоциативные или эвристические. Технологии **второго поколения** характеризуются двумя дополнительными особенностями: глубокими знаниями и машинным обучением.

Во втором поколении рассматриваются три метода получения знаний: изучение правил на примерах, изучение правил на основе моделей и полуавтоматическое получение моделей. Человеко-машинный процесс получения и уточнения знаний расширяет роль экспертных систем до систем экспертной поддержки, поскольку и человек, и машина учатся в ходе повторяющихся циклов уточнения знаний. Объяснение решений и самой базы знаний имеет решающее значение для этого процесса человека-машинного обучения.

Получение экспертных знаний представляет собой широкую область и включает в себя обращение к экспертам за конкретной информацией (фактами, данными, источниками, требованиями) или экспертными суждениями по актуальным вопросам (предпочтения, полезно-

сти, вероятности, оценки). Экспертом можно считать человека, чьи знания имеют отношение к рассматриваемому вопросу. В предметной области могут возникать риски, характеризующиеся неопределенностью и двусмыслинностью.

Неопределенность возникает из-за отсутствия данных или опасений по поводу ясности и качества данных и описывает уровень уверенности экспертов в оценке и влияние конкретного риска. Неопределенные риски включают последствия будущих разработок в продовольственных системах, таких как биотехнология, где эксперты не могут оценить точную вероятность риска для здоровья человека.

Неоднозначность связана с «множественностью точек зрения» на риск. В частности, риски не только **сложны** и **неопределены**, но и являются причиной **двусмыслинности**. Это означает, что существуют различные законные точки зрения, с помощью которых можно оценить, существуют ли или могут быть неблагоприятные последствия и являются ли эти риски терпимыми или даже приемлемыми [18].

В [18] используется метод прямой цепочки (рассуждений), при котором интерпретатор использует набор правил и набор фактов для выполнения действия. Этот метод включает проверку условной части правила, чтобы определить, истинно оно или ложно. Если условие истинно, то часть правила, содержащая действие, также является истинной. Эта процедура продолжается до тех пор, пока не будет найдено решение или не будет достигнут тупик. Прямая цепочка обычно называется рассуждением, управляемым данными. Этот метод состоит из трёх компонентов: набор правил; рабочая область хранения, содержащая текущее состояние системы; машина вывода, которая знает, как применять правила.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании анализируются известные модели представления знаний и их недостатки, даётся краткая характеристика явного и неявного знания и сложностях выявления второго, делается обзор на существующие подходы выявления и представления экспертных знаний.

Перспективным направлением данной области исследований является разработка интерфейса экспертной геоинформационной системы, которая позволила бы с высокой точностью и достоверностью получить знания (в том числе и неявные) от эксперта в области ГИС. Эти знания позволяют создать геоинформационную систему поддержки принятия решений на основе экспертных знаний и профессионального опыта, позволяющую решать трудные задачи ситуационного анализа с применением картографии.

ЛИТЕРАТУРА

- Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития [Электронный ресурс]: Материалы XXX научной конференции (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 18–20 апреля 2024 г.) – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2024.
- Sun Y., Giles C.L.* Popularity Weighted Ranking for Academic Digital Libraries // In: Proceedings of 29th European Conference on Information Retrieval Research. Rome, Italy, 5-7, April. 2007. – P. 605-612.

3. Alonso O., Devanbu P.I. and Gertz M. Expertise Identification and Visualization from CVS // In Proceedings of the 2008 international working conference on Mining\software repositories. – 2008. – P. 125-128.
4. Huang I.-H. and Huang M.L. Visualization of individual's knowledge by analyzing the citation networks // International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization. – 2007. – Vol. 0. – P. 465-470.
5. Поступов Д.А. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах. Букинист, 1989. – 328 с.
6. Louage F., Dobrowiecki T.P. and Pataki B. KNOWLEDGE-BASED SYSTEM IDENTIFICATION – COMPONENTS OF THE EXPERTISE. Intelligent Components and Instruments for Control Applications, Budapest, Hungary, 1994.
7. Nonaka I., Takeuchi H. The Knowledge Creating Company. – Oxford University Press, New York, 1995.
8. Yoo D., No S. Ontology-based economics knowledge sharing system // Expert Syst. Appl. – 2014. – 41. – P. 1331-1341.
9. Shah Murtaza Rashid Al Masud. A Knowledge Based System towards Identifying Problems and Getting Instant Solutions about Our Personal Vehicles. Vol. 2, No. 2, March - April 2013 International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – ISSN No. 2278-3091.
10. Marie José Vlaanderen. AUTOMATED KNOWLEDGE ACQUISITION FOR EXPERT SYSTEMS AN OVERVIEW. – 1990.
11. Cheryl Kieliszewski, Jie Cui, Amit Behal, Ana Lelescu, and Takeisha Hubbard. A Visualization Solution for the Analysis and Identification of Workforce Expertise. – 317-326.
12. Szafnicki K. and GentU S. A KNOWLEDGE BASE FOR AN EXPERT IDENTIFICATION PACKAGE // Control Eng. Practice. – 1995. – Vol. 3, No. 6. – P. 783-792.
13. Ramona – Diana Leon, Raúl Rodríguez-Rodríguez, Pedro Gómez-Gasquet, Josefa Mula. Social network analysis: A tool for evaluating and predicting future knowledge flows from an insurance organization // Technological Forecasting & Social Change. Technological Forecasting & Social Change. – 2016. – 114 (2017). – P. 103-118.
14. Henrik Smedberg, Sunith Bandaru. Interactive knowledge discovery and knowledge visualization for decision support in multi-objective optimization // European Journal of Operational Research. – 2021.
15. Bandaru S., Ng A.H., & Deb K. Data mining methods for knowledge discovery in multi-objective optimization: Part B-New developments and applications // Expert Systems with Applications. – 2017. – 70. – P. 119-138.
16. Farhang-Mehr A., & Azarm S. Entropy-based multi-objective genetic algorithm for design optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2002. – 24 (5). – P. 351-361.
17. Guy A. Fotso Kamga, Yacine Bouroubi. Expert knowledge-based modelling approach for mapping beekeeping suitability area // Ecological Informatics. – 2023.
18. Hadjigeorgiou E., Clark B., Simpson E. A systematic review into expert knowledge elicitation methods for emerging food and feed risk identification // Food Control. – 2021. – 136 (2022). – 108848.

Разработка программно-аппаратного комплекса для обеспечения стабильного Интернет-соединения в движущемся транспорте

Кутковой Владимир Сергеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kutkovo@sfedu.ru

Алмаз Александра Алексеевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
almaz@sfedu.ru

Аннотация. При путешествиях на большие расстояния одним из недостатков использования железнодорожного и автомобильного речевого транспорта являются проблемы со связью. Если при передвижении на коротких дистанциях, они обычно остаются незаметными, то при дальних поездках пассажирам приходится долго находиться в зонах вне действия сети. Для отдельных категорий людей, особенно молодых, это создаёт большие неудобства. Путешествуя на самолете, люди остаются вообще без связи на время полета, либо подключение к сети интернет стоит очень дорого. Разрабатываемый программно-аппаратный комплекс (ПАК), который состоит из контроллера, блока связи и поворотного антенного блока, который обеспечивает надежное подключение к интернету через вышку, расположенную вблизи железнодорожного маршрута, решает эту проблему. Он выполнен на базе современного микроконтроллера STM32, состоит из контроллера, блока связи и поворотного антенного блока, устанавливается на транспортное средство (автобус или Ж/Д вагон) и обеспечивает пассажиров Интернет-соединением за счёт поворотных направленных антенн, управляемых алгоритмом автоматического позиционирования.

Abstract. One of the disadvantages of rail and road transport is communication problems. If they usually remain invisible when traveling short distances, then on long trips passengers have to get into areas outside the network. For certain categories of people, especially young people, this creates great inconvenience. The hardware and software complex, which consists of a controller, a communication unit and a rotary antenna unit that provides a reliable Internet connection through a tower located near the railway route, solves this problem. It is made on the basis of a modern STM32 microcontroller, consists of a controller, a communication unit and a rotary antenna unit, is installed on a vehicle (bus or railway car) and provides passengers with an Internet connection due to rotary directional antennas controlled by a special positioning algorithm.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, микроконтроллер, мобильный интернет, направленная антenna.

Keywords: hardware and software complex, microcontroller, mobile Internet, directional antenna.

I. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОГО ИНТЕРНЕТ-СОЕДИНЕНИЯ В ТРАНСПОРТЕ

A. Интернет в самолёте

Для подключения к сети Интернет в самолёте используют две системы [1]:

- ATG (Air-to-Ground, Воздух – Земля).
- Спутник.

Система ATG представляет собой наземные базовые станции, которые передают сигнал на борт самолёта. На рис. 1 представлено схематичное описание работы ATG. Как только борт находится в зоне действия вышки, то автоматически подключается к ней. Принцип схож на работу обычной сотовой связи, где передача данных происходит "бесшовно", такой процесс называется хэндовер. Однако обычным смартфоном получить доступ к сети нельзя, так как этот сигнал шифруется, затем принимается и обрабатывается специальным оборудованием на борту самолёта. Одна базовая станция покрывает порядка 100 м². Их располагают на тех участках, где проходят основные маршруты. Скорость стабильного Интернет-соединения достигает почти 10 мБит/с [2]. Самый большой минус данной системы заключается в том, что базовые станции существуют только наземного типа. Если самолёт будет лететь над морем или океаном, то связь прервётся до входа в зону действия наземных станций. В США активно используют ATG. В стране развернута сеть Aircell, которая состоит из 160 базовых станций CDMA2000.

Спутниковые системы работают по принципу ретранслятора. Зона покрытия достаточно большая и обеспечивает стабильную скорость в диапазоне от 50 до 100 мБит/с. Для использования такого типа систем, на самолёты устанавливают специальную антенну, которая создаёт дополнительные аэродинамические помехи, тем самым увеличивая затраты на топливо. Также расстояние, которое должны пройти данные, чрезвычайно велико, что увеличивает задержку в сети. На рис. 2 представлено схематичное описание работы спутниковой системы.

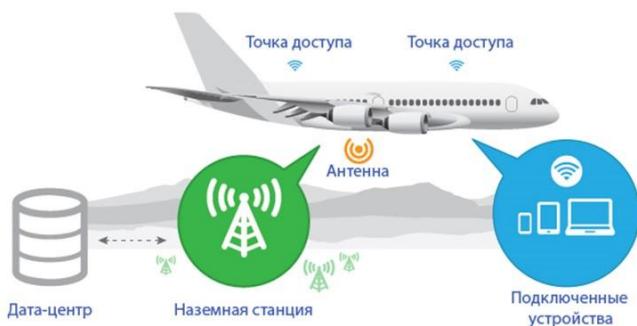


Рис. 1. Принцип работы ATG



Рис. 2. Принцип работы спутниковых систем

B. Интернет в поезде

В поездах предоставляется Wi-Fi сеть, через которую осуществляется выход в Интернет. Работают такие точки доступа, как обычный модем, соединение берётся из общей сети мобильной связи. Поэтому здесь всё зависит от качества покрытия. Обычно, операторы сотовой связи, располагают свои вышки там, где проживает много людей. Многие железнодорожные маршруты пролегают через живописные места, горы, озера и побережья, позволяя путешественникам насладиться красотой природы во время пути, однако в таких местах мало вышек. На рис. 3 представлена карта покрытия 4G сотовой связи на примере Ростовской области;

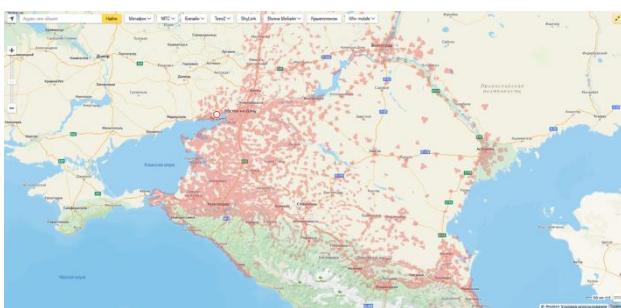


Рис. 3. Покрытие сотовой связи 4G Ростовской области

На рис. 4 показаны вышки сотовой связи вблизи железнодорожного маршрута "Таганрог–Ростов". Данные взяты с крупнейшей в мире открытой базы данных вышек сотовой связи [3].

Комфортной для браузинга, серфинга в социальных сетях, в том числе и онлайн игр оптимальная скорость подключения – 2 мБит/с на одного пассажира. В плацкартном вагоне есть 54 места. Соответственно для этого

вагона необходимая минимальная скорость составляет – 108 мБит/с. Сеть 3G, при стабильном соединении, обеспечивает максимум до 42,2 мБит/с.

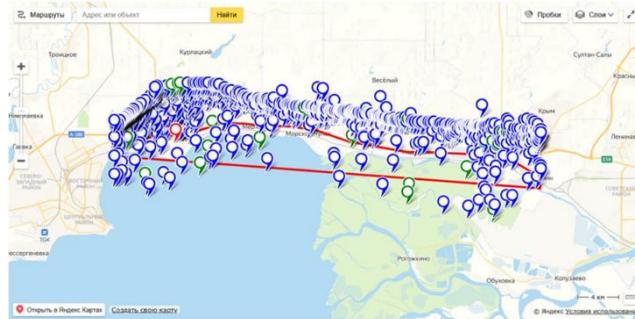


Рис. 4. Вышки сотовой связи вблизи железнодорожного маршрута "Таганрог–Ростов"

Чтобы компенсировать отсутствие выхода в сеть Интернет в компании "РЖД" разработали локальную информационно-развлекательную систему "Попутчик" [4]. В ней можно ознакомится с расписанием и информацией о поезде, магазине на борту, заказать блюда из вагона ресторана, также посмотреть фильмы, послушать аудиокниги и почитать прессу. В данной системе также предоставляется доступ в Интернет, но при наличии технической возможности, обусловленной покрытием сетей мобильных операторов связи в месте дислокации поезда в определенный момент времени [4].

II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ПАК

A. Архитектура аппаратного обеспечения

ПАК проектирован на базе микроконтроллера STM32G431CBT6 [5]. Микроконтроллер STM32 – популярная и очень востребованная платформа, позволяющая создавать профессиональные решения для автоматизации в самых различных областях. Микроконтроллеры STM32G4 построены на базе процессорного ядра ARM Cortex-M4 с тактовой частотой 170 МГц, с блоком операций с плавающей запятой и расширениями DSP.

В состав ПАК входят следующие блоки:

- 1) Модуль управления двигателем.
- 2) Модуль работы с SD-картой.
- 3) Модуль определения местоположения.
- 4) Модуль коммутации с ПК.

Модуль управления двигателем необходим для поворота механизма антенны на заданный угол в процессе движения поезда. В него включена силовая часть на транзисторах STD60N55F3, которые управляются с помощью драйверов L6388E. Драйверам подаются ШИМ сигналы с микроконтроллера. Данный драйвер имеют аппаратную поддержку DeadTime – это задержка по времени положительных фронтов управляющих сигналов для исключения аварийных ситуаций.

Был выбран двигатель со следующими характеристиками:

- Мощность: 1820 Вт;
- Размер вала: диаметр 8 x 20 мм;
- Тяга: 3–5,5 кг;
- Максимальное напряжение: 41,5 В;

- Длина двигателя: 78 мм;
- Диаметр двигателя: 50 мм;
- Вес: 490 г;
- Ток холостого хода: 1,0–3,3 А;
- Напряжение холостого хода: 13 В;
- Материал: металл.

Модуль работы с SD-картой необходим для чтения базы данных вышек сотовой связи, в которой содержатся их координаты и тип самой базовой станции.

Модуль определения местоположения необходим для получения текущих координат транспортного средства и азимута для вычисления конечного угла поворота антенны.

Модуль коммутации необходим для подключения ПАК к компьютеру с целью обмена данными и ручного управления комплексом при необходимости.

Связь перечисленных выше модулей представлена на рис. 5.

В качестве модуля коммутации с вышкой сотовой связи выбран Wi-Fi роутер KEENETIC Hero 4G+. Он обладает необходимыми для работы ПАК характеристиками [6]:

- Встроенный сотовый модем Cat.6 на базе чипа ASR1826;
- Для SIM-карт LTE/4G/3G любых операторов;
- Multi-WAN с резервированием и приоритетами;
- Внешние сменные LTE/4G-антенны;
- Внешние двухдиапазонные Wi-Fi-антенны 5 дБи.

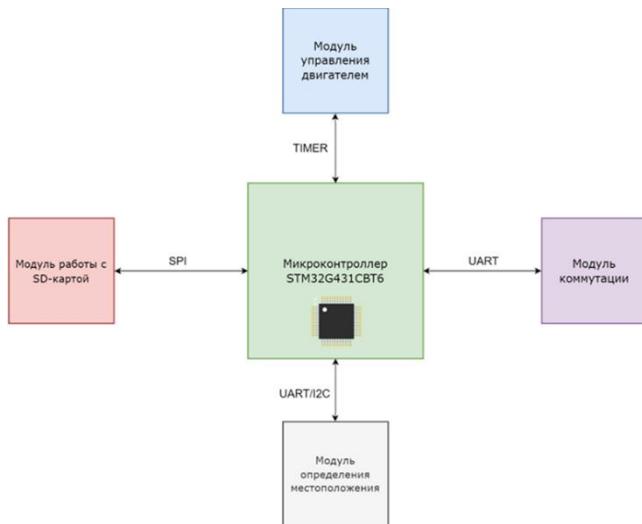


Рис. 5. Аппаратная архитектура

Для приёма сигнала с базовой станции была выбрана параболическая антенна Kroks KNA24-1700/4200P. Она имеет малое сопротивление ветру (низкую ветровую нагрузку) и необходимый диапазон частот: от 1700 до 4200 МГц.

B. Архитектура программного обеспечения

Программное обеспечение датчика наполненности разделено на следующие функциональные модули:

- Модуль управления двигателем.
- Модуль работы с SD-картой.
- Модуль работы с GPS.
- Модуль обмена данными.
- Модуль математических расчётов.
- Модуль работы с интерфейсом UART.
- Модуль работы с интерфейсом SPI.
- Модуль работы с GPIO-портами.

Схематичное представление архитектуры программного обеспечения представлено на рис. 6.

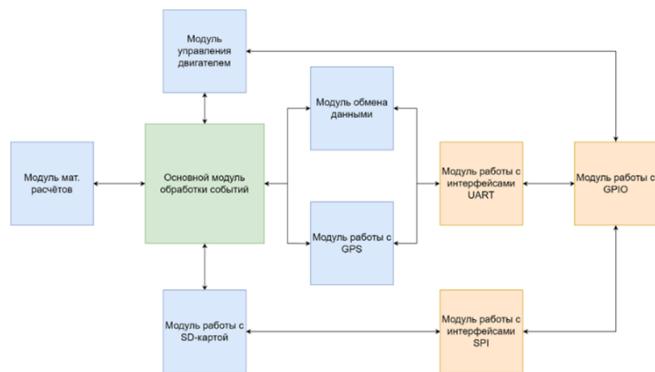


Рис. 6. Программная архитектура ПАК

C. Проектирование алгоритмов работы ПАК для обеспечения корректной работы

Программное обеспечение датчика наполненности разделено на следующие функциональные модули:

Общий алгоритм работы основной программы разделён на следующие составляющие:

- 1) Алгоритм управления двигателем.
- 2) Алгоритм подсчёта угла поворота.
- 3) Алгоритм парсинга данных с GPS.
- 4) Алгоритм парсинга данных о вышках сотовой связи.

Управление двигателем осуществляется при помощи следующего алгоритма:

- 1) Инициализация необходимой периферии.
- 2) Проверка исправности датчиков холла двигателя.
- 3) Запуск необходимого канала таймера для генерации управляющего ШИМ сигнала на обмотку двигателя.

- 4) Проверка поворота двигателя.
- 5) Переключение на следующий цикл работы фаз.
- 6) Повторение пунктов 3-6.

На рис. 7 представлена блок-схема двух вышеописанных алгоритмов.

Формула вычисления угла между составом поезда, на котором установлен ПАК и базовой станции представлена ниже:

$$\operatorname{tg} A = \frac{\cos \alpha_2 * \sin(\beta_2 - \beta_1)}{|\cos \alpha_1 * \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1 * \cos \alpha_2 * \cos(\beta_2 - \beta_1)|}. \quad (1)$$

Задача парсера, который передает координаты местоположения поезда в основной модуль обработки событий, получает на вход в виде строк, всё то, что приходит с интерфейса UART и далее обрабатывает данные в соответствие с протоколом NMEA 0183. NMEA 0183 (от "National Marine Electronics Association") – стандарт, который определяет текстовый протокол связи навигационного оборудования [7]. Программный код работает на основе событийной модели. Главный модуль переключается между обработчиками в зависимости от категории входных данных. Заголовок команды, тело команды и ответ на команду.

Парсер, который обрабатывает данные о сотовых вышках, считывает файл формата ".csv" с SD-карты. Чтение в данной ситуации происходит "частями" (чанками), где первый чанк – это начало файла, а последний – его конец. Такое решение обусловлено большим размером входных данных. Также информация о вышках отсортирована и сгруппирована по коду местности, что позволяет быстро и эффективно перемещаться по файлу и получать координаты ближайшей базовой станции.

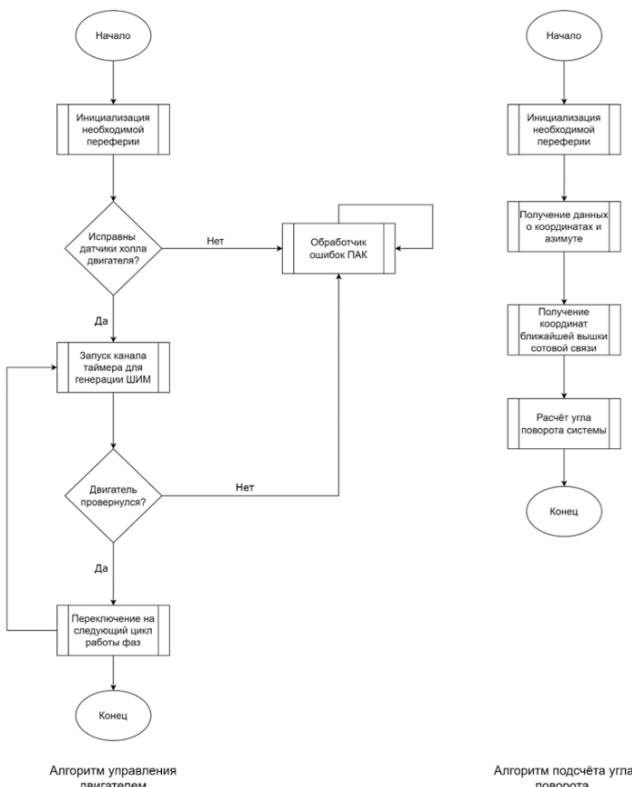


Рис. 7. Алгоритмы управления двигателем и подсчёта угла поворота

III. РАЗРАБОТКА ПОВОРОТНОГО МЕХАНИЗМА АНТЕННЫ В КОНСТРУКЦИИ ПАК

Основной задачей ПАК является наведение антенны на ближайшую вышку сотовой связи. Для этого необходимо разработать поворотный механизм, который будет передавать вращение вала двигателя на антенну. На рис. 8 представлена 3D-модель разработанного поворотного механизма.

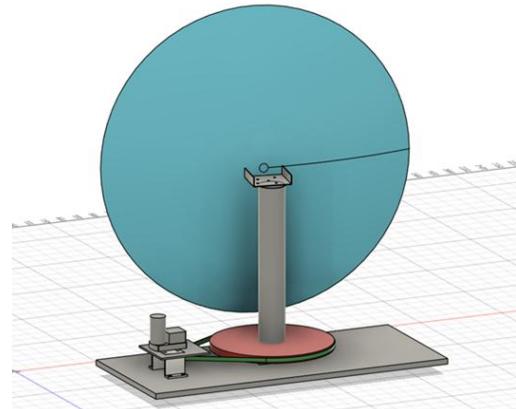


Рис. 8. Модель поворотного механизма

Механизм состоит из следующих составляющих:

1) Основание, на котором закреплены все необходимые части. Оно обеспечивает устойчивость и жесткость всей конструкции.

2) Поворотная муфта – центральный элемент механизма, на который устанавливается антenna, обеспечивает передачу вращательного движения от двигателя к антенне.

3) Двигатель, который управляет сигналами от контроллера и преобразует электрические сигналы в механическое движение.

4) Соединительные элементы, которые объединяют компоненты воедино.

Микроконтроллер рассчитывает угол поворота антенны, подаёт управляющие сигналы на двигатель, он в свою очередь передает вращательное движение на поворотную муфту, которая вращает антенну. Конструкция имеет неполный поворот вокруг оси. Это связано с наличием проводов, которые могут быть повреждены при полном обороте на 360 градусов. В дальнейшем планируется доработать конструкцию для решения этой задачи.

IV. СИНЭРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для поворота механизма с антенной будет использована синергетическая теория управления для синтеза следящего регулятора, который обеспечивает изменение углового положения двигателя постоянного тока (ДПТ) согласно априори неизвестному входному сигналу [8, 9].

Модель ДПТ с независимым возбуждением описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\theta}{dt} &= \omega, \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= c\Phi i_a - M_c, \\
 U_a &= L_a \frac{di_a}{dt} + i_a r_a + c\Phi \omega, \\
 U_b &= f_1(\Phi) r_b + 2p w_b \frac{d\Phi}{dt},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где θ – угловое положение,

ω – скорость,

U_a – напряжение на якоре,

U_b – напряжение на обмотке возбуждения,

Φ – магнитный поток,

r_a – сопротивление на якоре,
 i_a – ток якоря,
 r_b – сопротивление на обмотке возбуждения,
 w_b – число витков на полюс обмотки возбуждения,
 $f_1(\Phi)$ – функция обратная известной функции намагничивания,
 L_a – индуктивность обмотки якоря,
 J – момент инерции ротора,
 c – конструктивная постоянная двигателя,
 p – число пар полюсов обмотки возбуждения.

Положив постоянным магнитный поток, получим модель ДПТ с якорным управлением, за счет изменения напряжения якоря. Момент сопротивления нагрузки будем рассматривать как функцию механических переменных самого двигателя:

$$M_c = a\omega, \quad (3)$$

где a – коэффициент вязкого трения. Тогда система преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \omega, \\ J \frac{d\omega}{dt} &= c\Phi i_a - a\omega, \\ U_a &= L_a \frac{di_a}{dt} + i_a r_a + c\Phi \omega. \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве переменных состояния будут выступать ток якоря, скорость и угловое перемещение, в качестве управляющего воздействия – напряжение якоря.

Остальные переменные остаются постоянными коэффициентами. Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{c\Phi}{J} &= A \\ \frac{1}{L_a} &= B \\ x_1 &= \theta \\ x_2 &= \omega \\ x_3 &= i_a \\ U_a &= u \\ \frac{c\Phi}{L_a} &= C \\ \frac{a}{J} &= D \\ \frac{1}{J} &= E \end{aligned}$$

Тогда при данной замене из (3) получим следующую модель ДПТ в переменных состояния:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= Ax_3 - Ex_2 \\ \dot{x}_3 &= Bu - Cx_3 - Dx_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Для синтеза следящего регулятора используются принципы и методы синергетической теории управления [10–12].

Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) применим к широкому классу объектов, что делает его универсальным для решения задач управления в различных областях. Его можно применить как к линейным, так и к нелинейным объектам, учитывая, что при взаимодействии со средой линейные системы могут приобретать нелинейные свойства [13].

Важно подчеркнуть простоту метода, основанном на идеи поэтапной декомпозиции, который позволяет синтезировать регуляторы в аналитической форме, следовательно отсутствует необходимость в численных и приближенных процедурах. Для учета влияния внешних факторов и дополнительных условий используется идея расширения пространства состояний путем введения новых динамических переменных.

Если некоторый сигнал $g(t)$ меняется линейно во времени: $g(t)=g_1 t$, то динамика, которая описывает это изменение, представляется дифференциальным уравнением $\dot{g} = g_1$. Тогда модель (4), используемая при синтезе следящего регулятора, принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= Ax_3 - Ex_2 \\ \dot{x}_3 &= Bu - Cx_3 - Dx_2, \\ \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= 0 \end{aligned}$$

где z_1 – переменная модели опорного сигнала,

z_2 – переменная, которая описывает текущее значение коэффициента наклона аппроксимирующей прямой.

Регулятор должен обеспечивать асимптотическое схождение управляемой переменной к переменной опорного сигнала: $x_1 \rightarrow z_1$.

Процедура синтеза регулятора состоит из двух этапов. На первом для модели синтеза применяется стандартная процедура метода АКАР в предположении, что все переменные наблюдаемы. Второй этап, заключается в получении алгоритма вычисления оценки ненаблюдаемой переменной z_2 по значениям вектора наблюдаемых переменных x и вектора управления u , определенного на этапе 1. После этого в законе управления ненаблюдаемая переменная z_2 меняется на её оценку \hat{z}_2 .

Вводится следующее многообразие:

$$\psi_1 = x_3 - \varphi = 0. \quad (5)$$

Декомпозированная система на инвариантном многообразии ψ_1 имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= A\varphi_1 - Ex_2 \\ \dot{\varphi}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

На заключительном этапе вводим следующее многообразие:

$$\psi_2 = x_2 - k(x_1 - z_1) = 0. \quad (7)$$

Внутреннее управление φ находится из решения основного функционального уравнения $T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$ относительно макропеременной ψ_2 :

$$\varphi = \frac{1}{T_2 A} (T_2 k x_2 + T_2 E x_2 - T_2 k z_2 - x_2 + k x_1 - k z_1).$$

Тем самым мы определили структуру первого многообразия (5).

$$\psi_1 = x_3 - \frac{1}{T_2 A} (T_2 k x_2 + T_2 E x_2 - T_2 k z_2 - x_2 + k x_1 - k z_1) = 0.$$

Решаем основное функциональное уравнение $T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$ относительно макропеременной ψ_1 и выражаем из него управление:

$$u = -\frac{1}{T_1 T_2 AB} (T_1 k x_2 + T_1 T_2 (A k x_3 - k E x_2 + A E x_3 - E^2 x_2 + A D x_2 + C A x_3 - T_1 A x_3 + T_1 (E x_2 - k z_2) - x_2 - T_2 (A x_3 + k x_2 + E x_2 - k z_2) + k (x_1 - z_1))).$$

A. Синтез наблюдателя

Наблюдатель – алгоритм, вычисляющий оценки неизмеряемых величин на основе значений измеряемых величин, математической модели объекта управления и другой априорной информации. При синтезе наблюдателя используется методика синергетического синтеза асимптотических наблюдателей [10]. Модель расширенной системы имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= g_0(x, u) + G_1(x)z \\ \dot{z} &= h_0(x, u) + H_1(x)z\end{aligned}'$$

где x – вектор наблюдаемых переменных, размерность которого n ,

u – вектор управляющих воздействий, размерностью m .

z – вектор ненаблюдаемых переменных, размерность которого k .

Количество наблюдаемых переменных $n=4$, ненаблюдаемых $k=1$. В данном случае получаем следующие матрицы:

$$g_0 = \begin{bmatrix} x_2 \\ Ax_3 - Ex_2 \\ Bu - Cx_3 - Dx_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad G_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Уравнение наблюдателя и уравнение оценки коэффициента наклона аппроксимирующей прямой находятся из выражений:

$$\begin{aligned}\dot{y} &= L(x)y - L(x) \int_0^x \Gamma(x)dx - h_0(x, u) + \Gamma(x)g_0(x, u), \\ \dot{z} &= \int_0^x \Gamma(x)dx - y\end{aligned}, \quad (9)$$

где u – переменные наблюдателя, L – матрица, задается из условия устойчивости наблюдателя, которая в данном случае содержит один элемент, и тогда условие устойчивости будет $L_1 < 0$.

Матрица $\Gamma(x)$ вычисляется из решения матричного уравнения: $\Gamma(x) \cdot G_1(x) = H_1(x) - L(x)$.

Подставим (8) в (9), получим уравнение наблюдателя и уравнение оценки коэффициента наклона, аппроксимирующей прямой $\hat{y} = l_1 y + l_1^2 z_1$.
 $\hat{z} \equiv -l_1 z_1 - v$.

$$\begin{aligned}\dot{y} &= l_1 y + l_1^2 z_1 \\ \hat{z} &= -l_1 z_1 - y\end{aligned}\quad (10)$$

С учетом оценки (10) запишем закон управления:

$$u = -\frac{1}{T_1 T_2 AB} (T_1 k x_2 + T_1 T_2 (A k x_3 - k E x_2 + A E x_3 - E^2 x_2 + A D x_2 + C A x_3) - T_1 A x_3 + T_1 (E x_2 + k (l_1 z_1 + y)) - T_2 (A x_3 + k x_2 + E x_2 + k (l_1 z_1 + y)) - x_2 + k (x_1 - z_1)).$$

V. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для анализа эффективности полученного закона управления было проведено моделирование замкнутой системы, параметры регулятора сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛЯТОРА

T_1	T_2	k	l_1
0,001	0,001	-100	-0,0001

Установим сигнал $g(t)=0,35t$. На рис. 9 график управляемой переменной и задающего сигнала.

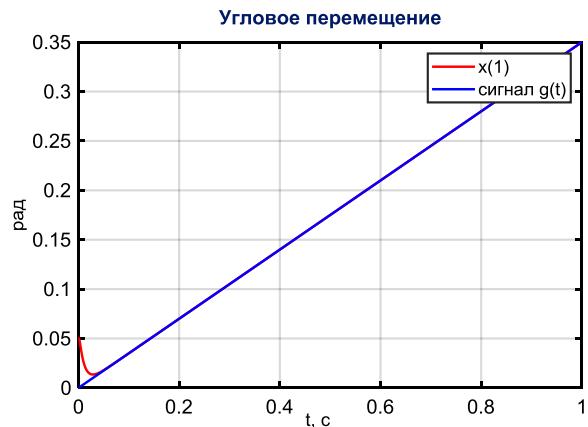


Рис. 9. Результат моделирования синтезированного регулятора при $g(t)=0,35t$ с

По результатам моделирования можно сделать вывод, что происходит схождение управляемой переменной с заданным сигналом, что свидетельствует о работоспособности синтезированного следящего регулятора.

Также для сравнения эффективности было получено
ещё два регулятора [13–15]. Использовался принцип
грубого управления вынужденным движением. Схема
представлена на рис. 10.

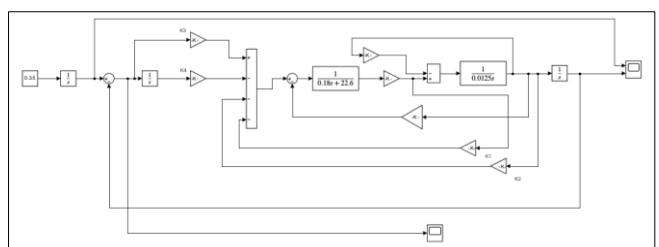


Рис. 10. Модель в MATLAB/Simulink грубой системы управления

Результат моделирования грубой системы управления с оптимальным регулятором с гарантированной степенью устойчивости, представлен на рис. 11.

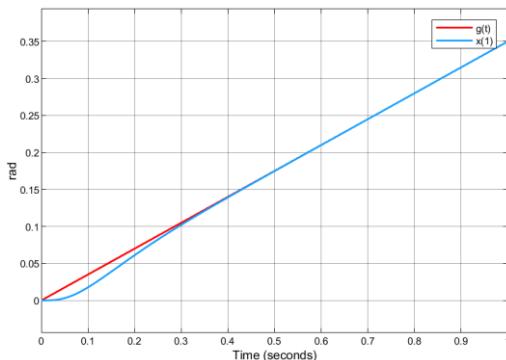


Рис. 11. Результаты моделирования системы оптимального управления

Результат моделирования грубой системы управления с регулятором, рассчитанным модальным методом, представлен на рис. 12.

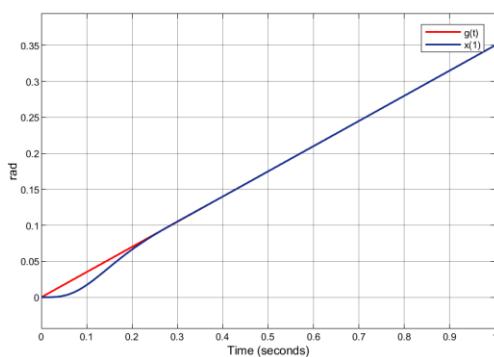


Рис. 12. Результаты моделирования системы модального управления

Из результатов моделирования можно сделать вывод, что самое быстрое схождение управляемой переменной и задающего сигнала обеспечил регулятор, полученный методом АКАР, далее по быстродействию идет модальный и после оптимальный. Скорость необходима для обеспечения точного позиционирования механизма антенны на необходимую вышку сотовой связи.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время работы над проектом были выполнены следующие задачи:

1) Исследование способов обеспечения стабильного Интернет-соединения в движущемся транспорте.

2) Проектирование архитектуры программного обеспечения ПАК для определения программных компонентов и взаимосвязи между ними.

3) Проектирование архитектуры аппаратного обеспечения ПАК для определения аппаратных компонентов и взаимосвязи между ними.

4) Проектирование алгоритмов работы ПАК для обеспечения корректной работы.

5) Разработка поворотного механизма антенны в конструкции ПАК.

6) Синергетический синтез следящего регулятора.

Было спроектировано 8 программных и 4 аппаратных модуля. Силовая часть, которая управляет двигателем, рассчитана на рабочее напряжение 36 В и нагрузку до

50 А. Скорость обмена данными с компьютером до 12 Мбит/с. Выбраны необходимые комплектующие для создания экспериментального образца. Разработан поворотный механизм, который позволяет вращать антенну весом до 5 кг и скоростью до 4 об/мин.

Была успешно реализована задача синергетического синтеза следящего регулятора. Применение метода АКАР для разрабатываемого ПАК обусловлено его быстродействием по сравнению с аналогами, что позволяет за короткий промежуток времени «настраиваться» на другую вышку сотовой связи. Принципиальными особенностями метода являются мобилизация всех предусмотренных конструкций каналов эффективного управления и возможность решать задачи синтеза для высокоразмерных систем, что делает такой регулятор универсальным. Также преимущество данного метода заключается в использовании аналитических методов, дающих строгое математическое решение и отсутствие необходимости в численных и приближенных процедурах, что важно при реализации алгоритма на микроконтроллере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Как работает интернет в самолётах [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/timeweb/articles/662968/>
2. Интернет в самолете: как это работает [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/inflight-internet-access/7267/?ysclid=lxgi3uwzeo715 799624>.
3. The world's largest Open Database of Cell Towers [Электронный ресурс]. – URL: <https://opencellid.org>.
4. Wi-fi в поездах РЖД [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rzd.ru/ru/11291/page/103290?id=17920&ysclid=lxhuuhsyzq114915305>.
5. STM32G431CB [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g431cb.html>.
6. Keenetic Hero 4G+ [Электронный ресурс]. – URL: <https://keenetic.ru/ru/keenetic-hero-4g-plus>.
7. The NMEA 0183 Protocol [Электронный ресурс]. – URL: <https://tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>.
8. Алмаз А.А. Синергетический синтез регулятора для следящей системы с двигателем постоянного тока // X Всероссийская научно-техническая конференция "ФПАКТИБ". – 2024. – С. 142-145.
9. Попов А.Н. Синергетический синтез следящих регуляторов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 7 (201). – С. 220-231.
10. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
11. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. Ч. 2. – Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2000. – 344 с.
12. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ТРГУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 7-27.
13. Григорьев В.В., Журавлева Н.В., Лукьянова Г.В., Сергеев К.А. Синтез систем автоматического управления методом модального управления. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.
14. Абдуллин А.А. Дроздов В.Н. Плотицын А.А. Синтез оптимального управления прецизионным электроприводом с гарантированной степенью устойчивости // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – Т. 91, № 3. – С. 46-51.
15. Абдуллин А.А., Дроздов В.Н. Анализ робастности неадаптивной системы управления электропривода с вариациями структуры и параметров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.

Анализ грозовой активности на территории Северного Кавказа: возможности технологий искусственного интеллекта

Кудринская Татьяна Владимировна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
tvkudrinskaya@sfedu.ru

Аджиев Анатолий Хабасович
Высокогорный геофизический институт
Нальчик, Россия
adessa1@yandex.ru

Куповых Геннадий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kupovukh@sfedu.ru

Гридин Константин Александрович
Центр дополнительного профессионального
и онлайн-образования Московского
физико-технического института
Москва, Россия
Gridnevvvv@yandex.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты выполненного интеллектуального анализа экспериментальных данных грозовой активности, полученные с 2019 по 2023 гг. на территории Северного Кавказа. Определены характерные значения числа грозовых часов и удельной поражаемости молний. Получены пространственно-временные особенности распределения молниевых разрядов положительного и отрицательного знака.

Abstract. The paper presents the results of the performed intellectual analysis of experimental data on thunderstorm activity obtained from 2019 to 2023 in the territory of the North Caucasus. The characteristic values of the number of thunderstorm hours and the specific incidence of lightning have been determined. The spatial and temporal features of the distribution of lightning discharges of positive and negative signs are obtained.

Ключевые слова: грозовая активность, молниевые разряды, искусственный интеллект, статистический анализ, интеллектуальный анализ.

Keywords: *thunderstorm activity, lightning discharges, artificial intelligence (AI), statistical analysis, Data mining.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Грозовые явления в приземной атмосфере связаны с образованием мощных кучево-дождевых сильно электризованных облаков и как результат электрическими разрядами разного типа между разноименно заряженными областями облака – облачные разряды или между разными облаками – межоблачные разряды, а также между облаками и землей – наземные разряды.

Своевременное обнаружение молний и наблюдение за развитием в пространстве и времени грозовых облаков позволяют во многих случаях избежать или существенно уменьшить ущерб от их воздействия. При этом характеристики грозовой активности рассматриваются как фак-

тор региональных климатических изменений, знание среднестатистических параметров молний и удельной поражаемости территории молниями могут способствовать разработке молниезащитных мероприятий различных объектов [1].

Интерес к исследованию грозовых процессов в глобальной электрической цепи (ГЭЦ) достаточно высок на протяжении уже нескольких десятилетий. При этом физические механизмы влияния ГЭЦ на глобальные процессы в атмосфере требуют надежной проверки, а использование корреляционного анализа не освобождает от вопросов определения скрытых параметров, а также проблеме накопления экспериментальных данных и фундаментальной проблеме выдвижения и статистической проверки физической гипотезы с использованием одних и тех же данных [2].

Исследования грозовой и молниевой активности на территории Северного Кавказа имеют более 10-летнюю историю. Анализ среднегодовых факторов грозовой активности с использованием данных ГПС ФГБУ «ВГИ» показало что [3, 4]:

- наибольшее количество дней с грозой имеет место в летние месяцы;
- наблюдается снижение грозовой активности за последние годы на исследуемой территории;
- отмечается преобладание отрицательных разрядов по сравнению с положительными разрядами.

Подобный анализ грозовой активности за 10-летний период проведен и для некоторых пунктов на территории Ирака и Турции [5]. Показано, что количество грозовых дней за 10-летний период на территории Ирака увеличилось, а пиковыми месяцами грозовой активности на исследуемой территории являются март, апрель и май. Анализ 11-летних временных рядов количества грозовых

разрядов на территории северной Азии (Якутия) показал положительный тренд в 2009–2019 гг., а пики грозовой активности приходятся на летний период [6].

Сегодня искусственный интеллект (ИИ) используется почти во всех отраслях, и инструменты, предоставляемые искусственным интеллектом в науке, не являются исключением. Системы «глубокого обучения» позволяют из массивных обучающих наборов данных распознать закономерности и выявить аномалии в наборах данных. Распределение параметров молний имеют вероятностный характер и могут существенно отличаться по территориям, не учит этого обстоятельства при решении задач молниезащиты различных объектов приводит обычно к занижению или неоправданному завышению уровней надежности грозозащиты. Таким образом, применение инструментов интеллектуального анализа к данным по грозовой активности может способствовать выявлению закономерностей и возможности прогнозирования. Следует помнить, что ИИ – это инструмент, который может автоматизировать некоторые процессы и упростить работу, но исследование требует глубокого понимания контекста и тематики.

II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа многолетней динамики грозовой активности привлекались экспериментальные данные за 5 лет (с 2019 по 2023 гг.). В исследовании использованы данные, полученные с помощью грозопеленгационной сети (ГПС) ФГБУ «Высокогорного геофизического института» с пространственно разнесеными датчиками.

Грозопеленгационная сеть состоит из четырех грозопеленгаторов LS8000 фирмы Vaisala, расположенных около населенных пунктов: Черкесск (КЧР), Кызыбурун (КБР), Ставрополь и Зеленокумск (Ставропольский край) и центрального пункта приема и обработки информации от грозопеленгаторов, расположенного в г. Нальчик [7].

Принимаемая датчиками ГПС электромагнитное излучение молний передается по спутниковому каналу связи в центральный сервер, где после обработки программным обеспечением формирует следующую информацию о каждом молниевом разряде:

- Дата и время.
- Координаты места разряда (широту, долготу) в системе геодезических координат.
- Максимальное значение тока в канале разряда молнии «облако-земля» в кА.
- Время роста тока молнии «облако-земля» до пикового значения в мкс.
- Время спада сигнала от пикового значения до нуля в мкс.
- Максимальное значение скорости увеличения сигнала (крутизна тока молнии) в кА/мкс.

Каждый грозопеленгатор имеет по два датчика – низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF). Низкочастотный датчик LF фиксирует, в основном, молниевые разряды типа Облако-Земля, высокочастотный датчик VHF фиксирует молниевые разряды только типа Облако-

Облако и внутриоблачные. Зоны обзора для разных типов молниевых разрядов различные. Для молниевых разрядов Облако-Земля радиус области обзора составляет 625 км от центров сети, а разрядов Облако-Облако 325 км.

Технологии искусственного интеллекта (ИИ) представляют собой быстрый, высокоэффективный и ресурсосберегающий вычислительный инструмент для исследований больших массивов данных. В работе для исследования физико-статистических параметров молний применялись методы интеллектуального анализа данных (Data mining):

- анализ временных рядов (Time series analysis) набор заимствованных из статистики и цифровой обработки сигналов методов анализа повторяющихся с течением времени последовательностей данных;
- визуализация (Visualization) – методы графического представления результатов анализа больших данных в виде диаграмм для интерпретации полученных результатов;
- регрессия (Regression) для прогнозирования и предсказаний - набор статистических методов для выявления закономерности между изменением зависимой переменной и одной или несколькими независимыми.

Первичная обработка «сырых» данных, полученных измерителями включала объединение данных в одну таблицу, удаление дубликатов и лишних данных, определение дополнительных атрибутов (идентификатор грозы к которой принадлежит разряд). Сводная таблица содержит следующие данные: время начала и окончания грозы, количество разрядов в громе, время нарастания и время спада тока в канале молний, минимальная и максимальная сила тока, крутизна тока.

Последующая работа с данными производилась с помощью языка Python с использованием библиотек [8]:

- Pandas – для работы с таблицами, т.к. данный модуль поддерживает основные статистические методы. С помощью него выполнены группировки и выборки, расчёт средних значений, их распределение по квантилям.
- NumPy – для работы с массивами данных, т.к. имеется большое количество математических функций для работы с массивами, временными рядами.
- Seaborn – программный пакет визуализации для графического отображения информации.

Кроме того, использованы нетиповые функции для: рекурсивного чтения файлов в папке, объединения данных о грозовых разрядах в одну таблицу, группировки грозовых разрядов по грозам (рис. 1).

Рис. 1. Фрагмент работы кода

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

A. Число грозовых часов и плотность ударов молний

Интенсивность грозовой деятельности определяется числом грозовых часов или грозовых дней в году (T), удельной поражаемостью (n), а также значениями параметров молниевых разрядов (количество разрядов и значение тока молнии) [9].

Плотность ударов молний в землю можно рассчитать по следующей формуле:

$$n = \frac{a T}{100},$$

где T – среднегодовая продолжительность гроз в часах, a – коэффициент, характерный для данной территории (для Северного Кавказа принимается 6,7).

В результате интеллектуального анализа данных грозовой активности за период с 2019 г. по 2023 г. на рассматриваемой территории зафиксировано в среднем 2311 грозовых часов в год.

Плотность ударов молний варьирует от 0,01 до 2,12 км⁻² год⁻¹. При этом прослеживается годовая динамика с характерными увеличением значений в летний период.

B. Пространственно-временные распределения значений молниевых разрядов

Средние значения тока молниевых разрядов Облако-земля отрицательного знака (приносящие на землю отрицательный заряд) – 22 кА, положительного знака 27 кА. На рис. 2 представлен суточный и годовой ход величины тока молниевых разрядов положительного и отрицательного знака, осредненных за период 2019-2023 гг. Значения положительных разрядов – красная линия, значения отрицательных разрядов приведены по абсолютной величине синей линией.

Можно наблюдать, что в течение суток величина тока молниевых разрядов обоих знаков мало варьирует; а в годовой динамике наблюдаются большие значения в холодный период.

ТАБЛИЦА 1. СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПОРАЖАЕМОСТИ

Месяц	Плотность ударов молний в землю, км ⁻² год ⁻¹					
	2019	2020	2021	2022	2023	Cред
январь	0,02	0,05	0,08	0,49		0,16
февраль	0,01	0,09	0,10			0,07
март	0,07	0,01	0,07		0,10	0,06
апрель	0,42	0,11	0,38	0,59	0,48	0,40
май	0,97	0,88	0,91	0,49	0,67	0,78
июнь	1,36	1,60	1,43	1,34	0,91	1,33
июль	1,25	1,60	0,94	1,40	1,75	1,39
август	0,77	1,08	1,74	1,60	1,54	1,35
сентябрь	0,46	0,89	0,71	1,19	0,83	0,82
октябрь	0,20	0,54	0,28	0,74	0,63	0,48
ноябрь	0,19	0,40	0,20	0,33		0,28
декабрь	0,22	0,13	0,04			0,13

При этом количество молниевых разрядов отрицательного знака более чем в 2 раза больше, чем положительного знака; в среднем за указанный период 82330 разрядов отрицательных значений, 40230 – положительных.

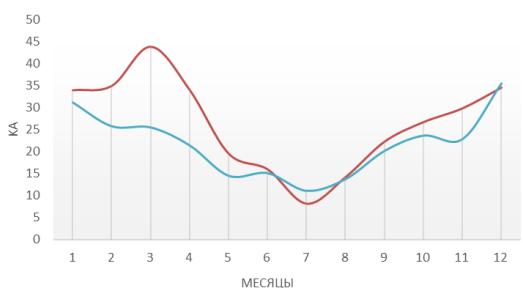
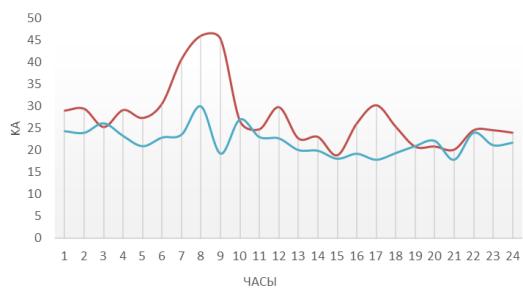


Рис. 2. Суточная и годовая динамика значений тока молний

На рис. 3 показано количество молниевых разрядов положительного (красные линии) и отрицательного (синие линии) знака осредненные для всего рассматриваемого периода для суточных и годовых вариаций.

Среднее количество разрядов (любого знака) больше в летние месяцы, максимальная повторяемость грозовой активности в каждом рассматриваемом году приходится на теплый сезон (май-сентябрь); в среднем от 25% до 40% всех гроз.

На основании данных по величине тока молний построены диаграммы пространственного распределения молний; по оси x указана широта, по оси y – долгота. На рис. 4 и 5 показаны диаграммы для года с наименьшим числом разрядов (2019 год) и для года с наибольшим числом разрядов (2021 год).

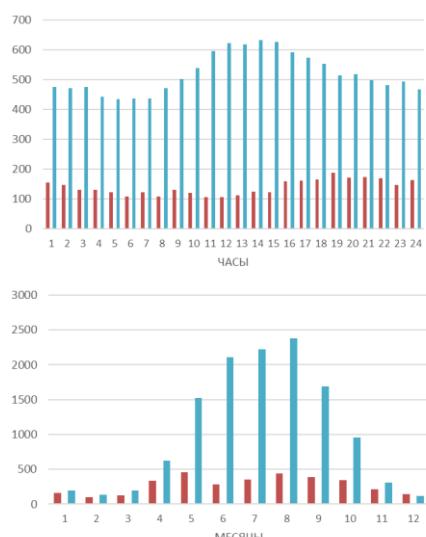


Рис. 3. Суточная и годовая динамика значений тока молний

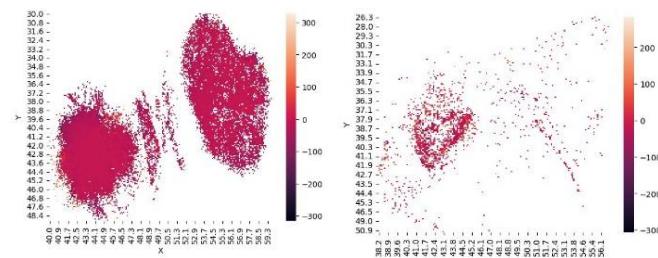


Рис. 4. Пространственное распределение значений тока разряда молний на территории Северного Кавказа в летний и зимний период за 2019 год

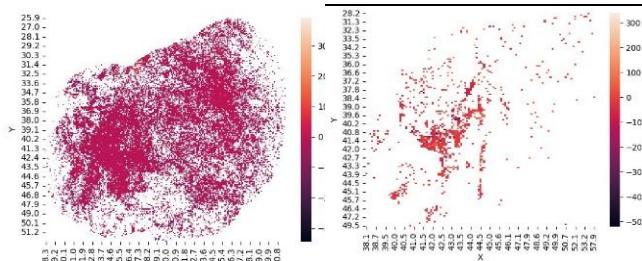


Рис. 5. Пространственное распределение значений тока разряда молний на территории Северного Кавказа в летний и зимний период за 2021 год

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные закономерности распределения грозовой активности могут быть использованы в дальнейшем для создания предсказательных моделей и формирования рекомендаций. При этом рассматривается возможность предсказания локализации, частоты, силы и полярности грозовых разрядов алгоритмами машинного обучения. На этом этапе важно выявить значимые параметры для обучения нейронной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аджиев А.Х., Князева З.М., Думаева Л.В. Анализ грозовой активности на территории Западного Кавказа по данным инструментальных регистраций и наблюдений на метеостанциях // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 3 (53). – С. 31-37.
2. Денисенко В.В., Ляхов А.Н. Сравнение наземных и спутниковых данных о пространственно-временном распределении грозовых разрядов при низкой солнечной активности // Солнечно-земная физика. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 111-119.
3. Аджиев А.Х., Керефова З.М. Статистический анализ данных о грозовой активности на Северном Кавказе // XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2022. – С. 345-349.
4. Аджиева А.А., Куповых Г.В., Керефова З.М. Результаты анализа грозовой деятельности на территории Республики Северная Осетия – Алания // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. – 2023. – № 4. – С. 61-69.
5. Аль-Хулайфави И.А. Анализ грозовой активности на территории Ирака и Турции // Известия УГГУ. – 2023. № 4 (72). – С. 164-169.
6. Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Иннокентьев Д.Е. Анализ 11- летней динамики пространственного распределения плотности молний в Северной Азии // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2021. – Т. 34, № 1. – С. 159-173.
7. Жарашиев М.В., Терекулов З.М. Методика статистического анализа грозовой активности на территории Северного Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2020. – Т. 14, № 3. – С. 92-98.
8. Уэс Маккинни. Python и анализ данных: Первичная обработка данных с применением pandas, NumPy и Jupiter: пер. с англ. А.А. Слинкина. – 3-е изд. – М.: МК Пресс, 2023. – 536 с.
9. Аджиева А.А., Керефова З.М., Гятов Р.А., Тумгоева Х.А. Исследование числа дней с грозой и продолжительности гроз в году на территории Северного Кавказа // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 8. – С. 32-36

Особенности разработки программного модуля динамической визуализации графовой модели

Зяблова Евгения Ростиславна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ermuntyan@sedu.ru

Боваев Арслан Батырович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
bovaev@sedu.ru

Литвиненко Виталий Николаевич
Военный учебный центр
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vilit@sedu.ru

Аннотация. В работе отражены особенности разработки программного модуля динамической визуализации графовой модели (ПМ). Данный ПМ является частью среды моделирования сложных систем на основе графов с множественными и разнотипными связями. Целью данного исследования является создание средств масштабирования больших графов, повышающих их визуальную читаемость пользователем. Для достижения этой цели поставлены и решены задачи разработки и реализации алгоритмов для сокращения размерности графов и реализации методов динамической визуализации, позволяющих отслеживать изменения в графах. Результаты тестирования разработанного ПМ показали удовлетворительные результаты.

Abstract. The paper reflects the features of the development of a software module for dynamic visualization of a graph model (SM). This SM is part of an environment for modeling complex systems based on graphs with multiple and different types of connections. The purpose of this study is to create tools for scaling large graphs, increasing their visual readability by the user. To achieve this goal, the tasks of developing and implementing algorithms for reducing the dimension of graphs and implementing dynamic visualization methods that allow tracking changes in graphs have been set and solved. The test results of the developed SM showed satisfactory results.

Ключевые слова: графы, визуализация данных, программный модуль.

Keywords: graphs, data visualizations, software module.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире большое количество информации может быть представлено в виде объектов и связей между ними, поэтому исследование взаимодействий объектов и/или субъектов в системах является актуальной задачей.

Для моделирования систем обосновано применение графовых моделей, в том числе классических ориентированных, неориентированных и смешанных графов, где вершины графа представляют собой объекты системы, а связи между вершинами – отношения в системе. С увеличением сложности систем, связанной с появлением разнотипных отношений между объектами, было предложено использование графов с разнотипными связями [1].

Однако, существенным недостатком таких графов являются большие временные затраты на анализ данных системы при помощи вычислений на графах. Для решения этой проблемы в работах [2, 3] предложено исполь-

зование в графах множественных связей в виде вектора, позволяющих объединить ряд разнотипных связей и уменьшить время анализа данных в системе.

Такие графы получили название «графы с множественными и разнотипными связями», эффективность применения которых при моделировании сложных технических и организационных систем подтверждена для решения ряда практических задач. Например, для анализа структурных характеристик в распределенной вычислительной системе [4], при разработке онтологии сложной многосвязной динамической предметной/проблемной области [5], при моделировании организационной системы [2] и др. В работах [3, 6, 7] подробно рассмотрены вопросы использования таких графов для моделирования и анализа сложных технических систем на примере решения задачи обеспечения безопасности системы охраны протяженного периметра.

Данная работа посвящена разработке интерфейской части среды моделирования сложных систем на основе графов с множественными и разнотипными связями.

Исследователи и аналитики сталкиваются с несколькими проблемами, которые могут затруднить визуализацию и анализ данных. Одной из проблем является вычислительная сложность, то есть, когда обработка больших объемов информации требует значительных вычислительных ресурсов, что может привести к задержкам и увеличению времени ожидания. Еще одной проблемой при отображении графа является разнотипность и множественность связей. Связи в системе могут быть разных типов и означать разные отношения между объектами, поэтому важен выбор цветовых схем, чтобы модель была удобна для анализа и вычисления характеристик. Также при взаимодействии с большим графиком необходимо учитывать его масштаб. При изменении масштаба должна сохраняться его структура и связи между вершинами [8].

Целью данного исследования является создание средств масштабирования графа, повышающих его визуальную читаемость пользователем.

Для достижения этой цели решены следующие задачи:

- 1) разработка и реализация алгоритмов для сокращения размерности графов (уменьшение количества вершин) с целью повышения их визуальной читаемости;
- 2) реализация методов динамической визуализации, позволяющих отслеживать изменения в графах.

II. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

На рынке уже существуют готовые программы для визуализации графовых моделей таких как: Gephi и GraphX. Данные продукты обеспечивают:

- настройку макетов графа;
- экспорт данных;
- широкий набор инструментов для визуализации графов;
- допускается разнотипность связей.

Однако несмотря на множество преимуществ у данных программ есть и существенные недостатки:

- проблемы с масштабируемостью графов;
- большая нагрузка на системы при работе с моделями большой размерности (от 10000 вершин);
- не учитывается разнотипность вершин модели;
- не учитывается множественные связи в виде вектора, что приводит к росту времени анализа данных.

В целом, данные аналоги являются мощными инструментами для визуализации графовых моделей, которые достаточно просты в освоении и имеют множество возможностей для работы с данными, однако они не решают проблему с масштабируемостью графа и плохо работают с большими графиками, нагружая систему, в связи с чем возникают задержки в работе этих инструментов [9].

Также в области визуализации и анализа графов существует несколько программных продуктов, ориентированные на конкретные (специализированные) области применения. I2 Analyst's NoteBook широко применяется в разведывательных и правоохранительных органах, имея большой набор методов визуализации, но его перегруженный интерфейс и высокая стоимость лицензирования могут вызывать сложности.

Sentinel Visualizer, с более удобным интерфейсом и интуитивными функциями, также требует дополнительных навыков для использования определенных возможностей, что может быть проблемой для небольших организаций.

CrimeLink, ориентированный на уголовные расследования упрощает интеграцию и визуализацию связанных с преступностью данных, но имеет ограничения в настройке и расширенном анализе.

Xanalyse Link Explorer предлагает мощные инструменты визуализации и сетевой аналитики, но сложен в освоении и ограничен в интеграции дополнительного функционала.

Tom Sawyer Software обеспечивает настраиваемую визуализацию и поддержку различных форматов данных, однако его лицензирование также относится к высокому ценовому сегменту. Таким образом, все рассмотренные инструменты имеют ограничения и часто не являются общедоступными или предлагают урезанный функционал, что может затруднить их использование для широкого круга пользователей [10].

III. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГРАФОВОЙ СТРУКТУРЫ

Программный модуль визуализации графов (ПМ) является частью среды моделирования сложных систем на основе графов с множественными и разнотипными связями и отвечает за динамическое отображение данных [11]. Для реализации ПМ использована среда программирования Python 3. Основными функциями модуля являются:

- динамическая визуализация (обеспечение анимации и изменений графов в реальном времени на основе данных, полученных от пользователя);
- интерактивные возможности (пользователи могут взаимодействовать с визуализированными графиками, изменяя параметры отображения, фильтруя узлы и связи, а также просматривая детальную информацию о них);
- поддержка большого объема данных (модуль оптимизирован для работы с большими графиками, обеспечивая плавную работу и высокую производительность).

Для визуализации графов были использованы силовой алгоритм и алгоритм Фрюхтермана-Рейнгольда.

Силовой алгоритм, также известен как алгоритм направленной силы или force-directed algorithms. Данный алгоритм представляет собой класс методов визуализации графов, основанных на имитации физических взаимодействий между узлами графа. Они представляют узлы как заряженные частицы, а ребра как пружинные элементы, стремящиеся к сохранению определенного расстояния между связанными узлами.

Алгоритм Фрюхтермана-Рейнгольда, один из наиболее распространенных силовых алгоритмов, моделирует узлы графа как частицы с одноименными зарядами, которые отталкиваются друг от друга, и ребра как пружины, которые притягивают узлы, стремясь сохранить определенное расстояние между собой. При этом величина силы притяжения между узлами, соответствующими ребру, обратно пропорциональна их расстоянию [12, 13].

Кроме применения этих алгоритмов, для улучшения визуальной читаемости графа были использованы определенные подходы, например для сокращения размерности графа применяются:

- так называемый процесс «сжатия графа», где несколько смежных узлов объединяются в более крупные сущности (без изменения самой структуры), что помогает сократить количество данных и упростить структуру графа;
- возможности удаления изолированных узлов, которые не имеют связей с другими узлами, что помогает освободить память и улучшить производительность;
- фильтрация по критериям значимости позволяет сосредоточиться на наиболее важных частях графа, игнорируя менее значимые детали.

Динамическая визуализация – это методика представления данных, которая позволяет отображать изменения в графике в реальном времени или в заданных временных интервалах. Этот подход особенно полезен при анализе ди-

намических процессов, таких как эволюция социальных сетей, изменения в сетях транспортных маршрутов или динамика взаимодействий в биологических сетях [14].

Основная идея динамической визуализации заключается в том, чтобы позволить пользователям наблюдать, как изменяется структура графа со временем. Это может включать в себя анимацию, визуальные эффекты и интерактивные возможности для более глубокого погружения в данные. Например, можно показать появление и исчезновение узлов и связей, движение элементов графа или изменение их размера и цвета в зависимости от времени или других параметров.

Одним из преимуществ динамической визуализации является возможность выявления временных паттернов и трендов в данных, которые могут быть невидимы при статическом отображении. Кроме того, такой подход позволяет лучше понять динамику процессов и выявить возможные зависимости между событиями.

На рис. 1 продемонстрирован экран среды моделирования сложных систем на основе графов с множественными и разнотипными связями.



Рис. 1. Экран системы для работы с графом

ПМ позволяет создавать, удалять и редактировать связи и вершины через вызов соответствующей формы интерфейса, а также отображать работу используемых алгоритмов для анализа данных системы (рис. 2). На рисунке видна часть графовой модели, где использованы разнотипные вершины и связи (gv_2 , gv_{12} , ge_{11} , ge_{13} , ge_{22}), множественная связь в виде вектора (ge_{19}), что подтверждает соответствие разработанной среды моделирования исходным требованиям.

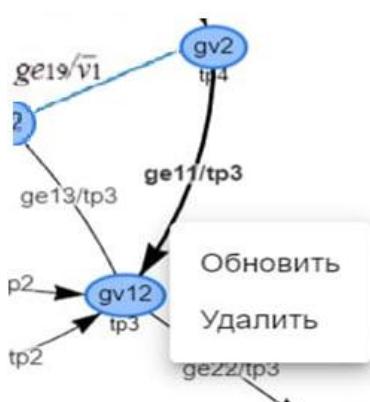


Рис. 2. Контекстное меню

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполнено тестирования разработанного ПМ с различными параметрами.

Для того, чтобы оценить время отображения информации разной сложности и размера были созданы графы с различным количеством вершин и связей. При помощи встроенных средств генерации были созданы графы различной размерности:

- граф $G1$ (1000 вершин и 2000 связей);
- граф $G2$ (5000 вершин и 10000 связей);
- граф $G3$ (10000 вершин и 20000 связей).

На рис. 3 показан пример визуализации графа $G1$.

Среднее время отрисовки графа $G1$ составило 300 мс, графа $G2$ – 600 мс, графа $G3$ – 900 мс. Результаты показали, что среда моделирования эффективно обрабатывает графы различного размера без значительных задержек.

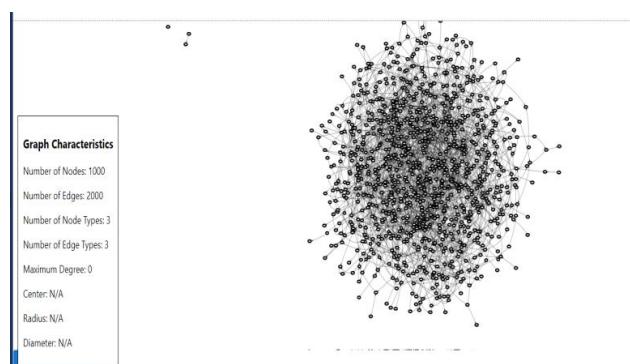


Рис. 3. Тестирование визуализации графа $G1$

Интерфейс показал высокую отзывчивость, среднее время реакции на пользовательские действия составило менее 50 мс. Все интерактивные элементы работали корректно и без задержек, что подтверждает удобство использования системы.

Для тестирования скорости и точности получения данных об узлах и связях модели из базы данных использованы следующие шаги:

- чтение данных всех узлов графа;
- чтение данных всех связей графа.

Среднее время чтения данных для 1000 узлов составило 50 мс, а для 2000 связей – 70 мс. Все данные были корректно извлечены, что подтверждает надежность разработанной среды моделирования сложных систем на основе графов с множественными и разнотипными связями.

Также была проверена корректность и время обновления атрибутов узлов и связей. Среднее время обновления одного узла составило 25 мс, а одной связи – 35 мс. Все изменения были успешно сохранены в среде моделирования, что подтверждает её устойчивость к операциям обновления.

Таким образом, можно сделать вывод, что данный модуль превосходит многие аналоги, такие как Gephi, в котором возникают задержки и перебои в работе с

большими графами, а также GraphX, для которого время обработки может занимать несколько секунд при значительном увеличении сложности и размерности графа.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе отражены особенности разработки программного модуля динамической визуализации графовой модели. Данный ПМ является частью среды моделирования сложных систем на основе графов с множественными и разнотипными связями.

При проектировании ПМ использованы силовой алгоритм и алгоритм Фрюхтермана-Рейнгольда. Кроме применения этих алгоритмов, для улучшения визуальной читаемости графа были использованы определенные подходы, позволяющие удалить изолированные вершины, выполнить «сжатие» графа, отфильтровать граф по критериям значимости.

Реализованы все необходимые функции ПМ, в том числе динамическая визуализация графа, использование интерактивных возможностей для пользователя и поддержка большого объема данных. Результаты тестирования разработанного ПМ показали удовлетворительные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Boccaletta S., Bianconi G., Criado R., del Genio C.I., Gómez-Gardeñes J., Romance M., Sendiña-Nadal I., Wangk Z., Zanin M.* The structure and dynamics of multilayer networks // Preprint submitted to Physics Reports. – 2014. – 157 p.
2. Мунтян Е.Р. Реализация нечеткой модели взаимодействия объектов сложных технических систем на основе графов // Программные продукты и системы. 2019. – Т. 32, № 3. – С. 411-418. – DOI: 10.15827/0236-235X.127.411-418.
3. Мунтян Е.Р. Аспекты использования нечетких ГН-моделей для представления социальных отношений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2020. – № 3 (7). – С. 113-121.
4. Еремеев А.П., Мунтян Е.Р. Разработка онтологии на основе графов с множественными и разнотипными связями // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2021. – № 3. – С. 3.18. – DOI: 10.14357/20718594210301.
5. Мунтян Е.Р., Мельник Э.В. Исследование структурных характеристик распределенных вычислительных систем на основе графов с множественными разнотипными связями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 186-198. – DOI: 10.18522/2311-3103-2021-3-186-198.
6. Мунтян Е.Р. Разработка алгоритма пропорционального разделения ГН-графа для формирования зон влияния объектов в сложных технических системах // Программные продукты и системы. 2023. – Т. 36, № 3. – С. 378-387. – DOI: 10.15827/0236-235X.143.378-387.
7. Зяброва Е.Р. Модификация алгоритма поиска кратчайших путей ГН-графа для анализа сложных технических систем // Программные продукты и системы. 2024. – Т. 37, № 3. – С. 354-363. – DOI: 10.15827/0236-235X.147.354-363.
8. Боваев А.Б. Анализ современных средств визуализации графов // Сборник статей «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». – 2023. – С. 177-180.
9. Иванов П.П., Сидоров А.А. Программные средства визуализации данных // Научный вестник МГТУ. – 2021. – № 2. – С. 45-53.
10. Костеников Д.В. Обзор технологий визуализации графов на Python // Конференция «Региональная информатика и информационная безопасность» – Научная электронная библиотека. – 2020.
11. Емельянов С.В., Королева Н.П. Применение методов визуализации больших данных // Журнал высоких технологий. – 2021. – № 5. – С. 98-107.
12. Михайлов В.Н., Романова Т.А. Анализ алгоритмов визуализации больших графов // Вестник ТГУ. – 2020. – № 5. – С. 34-42.
13. Martin P., Liu J. Advances in Graph Visualization // Journal of Data Science. – 2024.
14. Johnson R., Zhang T. Effective Data Visualization Techniques for Complex Datasets // arXiv. – 2021.

Организация распределенной обработки информации при формировании составных изображений

Козловский Александр Вячеславович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kozlovskiy@sedu.ru

Аннотация. В работе предлагается подход к организации процесса получения, обработки и хранения изображений и других ключевых данных при формировании составных изображений по шаблонам, полученным из различных источников распределенной системы мобильных объектов (агентов). Рассматривается основа предлагаемой концепции балансировки и управления параллельным процессом вычислений и агрегации данных. В первую очередь предлагаемый в работе подход предназначен для решения задач прикладной фотограмметрии.

Abstract. This paper proposes an approach to organizing the process of obtaining, processing and storing images and other key data in the formation of composite images based on templates obtained from various sources of a distributed system of mobile objects (agents). The basis of the proposed concept of balancing and managing the parallel process of computing and data aggregation is considered. First of all, the approach proposed in this paper is designed to solve the problems of applied photogrammetry.

Ключевые слова: распределенная обработка информации, формирование составных изображений, параллельные вычисления, ключевые точки, мобильные объекты, прикладная фотограмметрия.

Keywords: distributed information processing, composite image generation, parallel computing, key points, mobile objects, applied photogrammetry.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует потребность получения и обработки изображений высокого разрешения без использования мощных стационарных вычислительных систем. Примерами могут являться снимки земной поверхности для больших территорий, слежение за «историей» полета мобильных агентов, картография, восстановление трехмерного вида ландшафта, обработка поверхностей крупных строений в трехмерном пространстве и так далее.

Эта задача особенно актуальна в условиях динамически меняющейся обстановки, когда данные необходимо получать и обрабатывать в режиме реального времени, без возможности мгновенного доступа к мощным вычислительным ресурсам, когда из оборудования есть только собственные ресурсы мобильных агентов и их видеокамеры.

Формирование изображений высокого разрешения приводит к понятным проблемам при их передаче, обработке и хранении. Это лимиты числа обрабатываемых кадров в секунду, превышение объемов оперативной памяти и хранилищ, размеры передаваемых данных, ограничения трафика между устройствами и так далее [1, 2].

Переход от централизованной к децентрализованной обработке изображений с использованием принципов параллелизма и распределенных систем решает многие проблемы, кроме нагрузки на каждое конкретное устройство [3, 4].

В данной работе предлагается подход к организации процесса распределенной обработки информации при создании изображений высокого разрешения на основе формирования составных или, другими словами, распределенных изображений на базе управляемой системы мобильных агентов.

II. КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Базовым параметром эффективной системы обработки данных является задержка реакции на запрос. В этом плане мы работаем с такими понятиями как клиент-серверная архитектура и системы массового обслуживания. Узким местом таких систем, особенно с большим количеством параллельных узлов внутри является предварительный этап рассылки данных исходных изображений, синхронизация процессов обработки, формирование и фиксация результата [2].

Эти проблемы достаточно хорошо решаются следующим образом:

1. Исходным изображением для системы параллельной обработки на множестве мобильных агентов является не полноразмерное изображение, а его версия с низким разрешением (базовое или опорное изображение).
2. Исходными данными для каждого мобильного агента является его собственное координатное расположение относительно соответствующей секции базового изображения и кадр, снятый его камерой.

3. Процесс обработки кадров (частиц) составного изображения проходит параллельно на каждом мобильном агенте с применением алгоритмов выделения ключевых точек и дескрипторов изображений, а также их сопоставления и стабилизации.
4. Все составные изображения высокого разрешения хранятся распределенно на устройствах.
5. Агрегация данных происходит только при необходимости на центральном узле.

В целом, процесс получения и обработки составных изображений является итерационным и может быть представлен в следующем виде рис. 1.

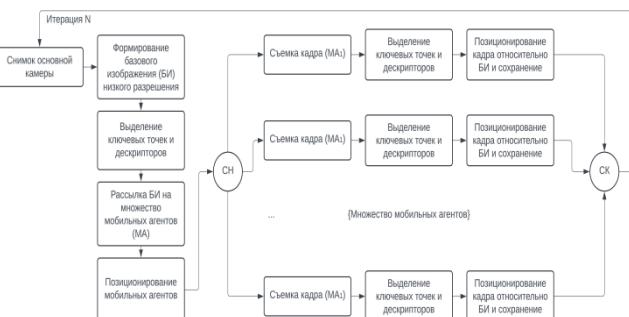


Рис. 1. Схема процесса получения и обработки составных изображений группой мобильных объектов

На рис. 2. представлена схема наложения фрагментов высокого разрешения на шаблон низкого разрешения.

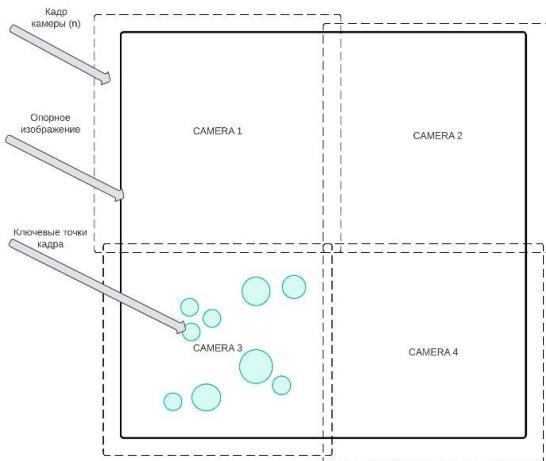


Рис. 2. Размещение кадров камер мобильных агентов над опорным изображением

Формально, процесс создания составных изображений на множестве мобильных агентов можно отобразить следующим образом.

Пусть I – шаг итерации и $I \in \{1, \dots, N\}$, X^I – кадр пространства на I шаге итерации, а F^I – обобщенное преобразование итеративного процесса. Тогда распределенное изображение в целом является отображением $Y^I = F^I(X^I)$.

R – операция редукции разрешения для формирования базового (опорного изображения), тогда $X_R^I = R(X^I)$ – это опорное изображение, как источник координат для группы мобильных агентов.

K_D – операция выделения ключевых точек и дескрипторов, тогда множество ключевых точек и дескрипторов опорного изображения будет формироваться как $X_{K_D R}^I = K_D(X_R^I)$.

Для экспериментов использовался метод SIFT (Scale Invariant Feature Transform), позволяющий сформировать 128-ми мерные дескрипторы по ячейкам 4 на 4 с 8-ю направлениями градиента в окне вокруг ключевой точки, которое поворачивается в соответствии с определенной ориентацией. В нашей задаче этот процесс формализуется как $K_D = H(G(x, y, \sigma), \theta(x, y))$, где $G(x, y, \sigma)$ – это градиенты изображения, $\theta(x, y)$ – направление градиента в локальной системе координат (x, y) , а дескриптор формируется путем суммирования вкладов градиентов в гистограмму направлений. Использование такого математического аппарата позволяет выделять ключевые точки для сшивки составных изображений инвариантно к изменениям масштаба, ориентации и освещенности, что особенно актуально в условиях съемки на камеры мобильных агентов в реальном времени и в реальных условиях.

Разделение полученного опорного изображения в виде позиционированного множества ключевых точек и дескрипторов на K кадров формирует множество ключевых точек и дескрипторов (признаков) $\{x_{K_D R}^I\}_{k \in K}$ (рис. 3).



Рис. 3. Распределение ключевых точек опорного изображения

В идеальном варианте число кадров соответствует числу доступных мобильных агентов M и позволяет расположить их в виде матрицы. В случае, когда $K \neq M$, один из мобильных устройств может заменить отсутствующее в «матричном представлении», но это приведет к увеличению времени обработки на каждом шаге итерации I [6–10].

В конечном счете, у нас получается распределенные элементы множества сегментов опорного изображения, их ключевых точек и дескрипторов $\{x_{K_D R}^I\}_{k \in K}$ на множество доступных мобильных объектов.

Для каждого мобильного агента, участвующего в процессе решения задачи, выполняется передача сегмента опорного изображения с его признаками $\{x_{K_D R}^I\}_k$. В этом случае, в динамической системе решается задача отображения множества кадров на множество доступных МА. Далее мы будем решать задачу «внутри» конкретной итерации I в обобщенном виде.

Пусть B – множество мобильных агентов, то есть $B = \{B_1, \dots, B_m\}_{m \in M}$, A – изображение, полученное на мобильном агенте для обработки на данной итерации I .

S – это отношение между изображениями и объектами. Тогда в рамках текущей задачи решается проблема распределения компонент распределенного изображения $A = \{A_1, \dots, A_p\}_{p \in P}$ (в идеальном случае $M = P$) как функция отношения следующим образом: $W: A \times B \rightarrow \{0, 1\}$, где $W(A_i, B_j) = 1$, если кадр A_i связан с мобильным агентом B_j и $W(A_i, B_j) = 0$ если нет связи, то есть размещению кадра на составном изображении не соответствует мобильный агент.

Таким образом, можем записать следующее выражение для распределения: $D = \{(A_i, B_j) | (A_i, B_j) = 1\}$, где D – множество реальных пар (мобильный агент и часть составного изображения), которые имеют связь по данным и процессам обработки.

В экспериментальной части исследования использовалось четыре мобильных устройства, то есть получалось соотношение

$$D = \{(A_1, B_1), (A_2, B_2), (A_3, B_3), (A_4, B_4)\}. \quad (1)$$

Для оценки вычислительной нагрузки на мобильные устройства использовались следующие принципы и учитывались следующие факторы. На величину нагрузки влияет количество изображений и выделяющихся объектов на них. Если мы приняли, что p – это количество изображений в текущей итерации на множестве точек изображения A , а m – это количество доступных мобильных объектов на множестве B , то общее количество соотношений будет равно $p \times m$. Для каждого кадра необходимо вычислить дескрипторы и ключевые точки. Если принять, что расчет дескриптора требует T_d времени, тот общее время будет равно $p \times T_d$. После извлечения дескрипторов необходимо сравнивать их между собой, то есть затрачивать время T_c – тогда общее время для всех сравнений для каждого кадра будет $O(p \times m \times T_c)$. И, наконец, отбор ключевых точек, позволяющий снизить количество сравнений до некоторого значения $l < p \times m$, также потребует $O(l \times T_c)$.

Учитывая сказанное выше, мы можем оценить вычислительную нагрузку на устройство как:

$$T_{total} = p \times T_d + O(l \times T_c), \quad (2)$$

где T_{total} – общее время выполнения,

p – количество изображений,

T_d – время расчета дескриптора,

l – отфильтрованное количество пар для сравнения,

T_c – время сравнения дескрипторов.

Для практического применения такого подхода необходимо провести ряд измерений и экспериментов, например измерить и оценить значения T_d и T_c для конкретных мобильных агентов, определить требуемое количество частей составного изображения, оптимизировать параметры фильтрации для отбора ключевых точек. Однако, данный подход помогает в планировании ресурсов и оптимизации алгоритмов в задаче организации распределенной обработки информации при формировании составных изображений.

Другой задачей является размещение (позиционирование) кадров составного изображения над опорным по детекторам и ключевым точкам. Представим, что $D_{ref} = \{d_{ref}^1, d_{ref}^2, \dots, d_{ref}^k\}$ – это множество дескрипторов SIFT опорного изображения, $D_{frame} = \{d_{frame}^1, d_{frame}^2, \dots, d_{frame}^m\}$ – множество дескрипторов SIFT кадра, а $K = \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$ – множество ключевых точек, соответствующих дескрипторам, редуцированное до l .

Тогда процесс сопоставления дескрипторов выполняется в несколько шагов на нашем множестве мобильных агентов. Для начала выполняется сопоставление дескрипторов, то есть для каждого дескриптора D_{frame} необходимо найти его соответствие в D_{ref} на основе некоторой метрики (например, евклидова расстояния):

$$S(d_{frame}^j, d_{ref}^i) = \begin{cases} 1, & \|d_{frame}^j - d_{ref}^i\| < t, \\ 0, & \end{cases} \quad (3)$$

где t – это некоторое пороговое значение. Далее формируется множество соответствий на основе результатов сравнения как $C = \{(d_{frame}^j, d_{ref}^i) | S(d_{frame}^j, d_{ref}^i) = 1\}$. После этого идет определение трансформаций (в локальной системе координат $\{x, y\}$). Пусть $P_{ref} = \{(x_{ref}^i, y_{ref}^i)\}_{i=1}^p$ – координаты ключевых точек из опорного изображения, $P_{frame} = \{(x_{frame}^j, y_{frame}^j)\}_{j=1}^l$ – координаты ключевых точек из кадра.

Трансформация выражается в афинных преобразованиях типа

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & tx \\ c & d & ty \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где (x', y') – обновленные координаты, (a, b, c, d) – параметры вращения и масштабирования, а (tx, ty) – параметры трансляции.

Параметры трансформации a, b, c, d, tx, ty в простейшем случае могут быть оценены с использованием метода наименьших квадратов на основе соответствий из множества C как $\text{minimize } \|P_{frame} - T(P_{ref})\|^2$, где $T(P_{ref})$ – преобразованные координаты ключевых точек опорного изображения.

При размещении кадров составного изображения над соответствующим сегментом опорного изображения приходится решать задачу коррекции ошибки расположения. Причины возникновения ошибки могут быть разные, например дисторсия объектива (бочкообразная или подушкообразная), неправильное положение камеры или смещения в позиции съемки мобильного агента.

Эти искажения можно описать как функцию: $E(k) = k + \varepsilon(k)$, где $E(k)$ – искаженные координаты ключевой точки, k – истинные координаты, а $\varepsilon(k)$ – искомая ошибка искажения. Для коррекции можно использовать известные модели исправления искажений, характерные для используемого оборудования. Например, для бочкообразного искажения можно использовать следующую формулу: $k' = k \cdot (1 + p_1 r^2 + p_2 r^4)$, где k' – скорректированные координаты, r – расстояние от центра изображения до точки, а p_1 и p_2 – коэффициенты дисперсии.

Тогда, на основе соответствий ключевых точек можно определить параметры аффинного преобразования для наложения кадра на опорное изображение и применить полученные параметры трансформации к координатам ключевых точек кадра: $K'_{frame} = T(K_{frame})$, где K'_{frame} фактически определяют новые координаты ключевых точек после применения трансформации.

В результате реализации предложенного подхода может быть получено изображение высокого разрешения, сформированное из отдельных фрагментов на основе шаблона низкого разрешения (рис. 4).



Рис. 4. Результат сшивки распределенного изображения

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенное выше формализованное решение задачи в своей реализации описывает подход к организации процесса распределенной обработки информации при формировании составных изображений на базе системы мобильных агентов. В первую очередь предлагаемый в работе подход предназначен для решения задач прикладной фотограмметрии. Предложенный подход обеспечивает на ряду с возможностью применения мобильных устройств с относительно простыми камерами снижение временных затрат пропорционально количеству применяемых устройств за счет распределенной обработки информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Гранта N Грант4L/22-04-ПИШ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельник Э.В., Онищенко С.В., Козловский А.В. Исследование возможности реализации мобильных комплексов для бесконтактного измерения геометрических параметров объектов // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Таганрог, 2022.
2. Самойлов А.Н., Волошин А.В., Козловский А.В. Алгоритмическое обеспечение системы интеллектуальной обработки цифровых изображений для задач прикладной фотограмметрии // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2019. – № 3 (246).
3. Капустян С.Г., Мельник Э.В. Системный анализ требований и оптимизация состава группы роботов в задаче мониторинга окружающей среды. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 12-25.
4. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Управление большими системами: сборник трудов. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 605.
5. Самойлов А.Н., Бородянский Ю.М. Метод построения фотограмметрических измерительных систем на основе мобильных облачных вычислений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. № 4. – eISSN: 2311-3103. – С. 166–174. – DOI: 10.18522/2311-3103-2021-4-166-174.
6. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Hybrid Algorithm of Mobile Position-Trajectory Control // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 8th Computer Science On-line Conference, Springer, Czech Republic. – 2019. – Vol. 2. – P. 287-295.
7. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Гибридный алгоритм управления роем гомогенных роботов в условиях ограниченного пространства // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (78). – С. 72-82.
8. Клименко А.Б., Мельник Я.Э. Исследование возможности применения концепции туманных вычислений и технологии распределенного реестра при построении информационно-управляющих систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 19-27.
9. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Научно-практический журнал Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 7-11. 15.
10. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление роем роботов при исследовании некоторой территории методом силовой релаксации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 184-193.

Секция III

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

DOI: 10.18522/syssyn-2024-35

Исследование процессов обработки информации одномерным распределенным сканером

Першин Иван Митрофанович
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский федеральный
университет
Пятигорск, Россия
ivmp@yandex.ru

Цаплева Валентина Викторовна
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский федеральный
университет
Пятигорск, Россия
vtcapleva@ncfu.ru

Антонов Владимир Феохорович
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский
федеральный университет
Пятигорск, Россия
antonovpgtu@mail.ru

Аннотация. В докладе рассматривается методика построения одномерной распределенной системы передачи и обработки информации, с использованием методологии исследования систем с распределенными параметрами. Показано исследование процессов в одномерной системе обработки информации. Рассматриваются примеры построения системы обработки информации при отсутствии возмущающих воздействий и при больших возмущающих воздействиях, накладываемых на передаваемые полезные сигналы. Приведены результаты численных экспериментов.

Annotation. The report discusses the methodology for building a one-dimensional distributed information transmission and processing system using the methodology of studying systems with distributed parameters. The study of processes in a one-dimensional information processing system is own. Examples of building an information processing system in the absence of disturbing influences and with large disturbing influences imposed on the transmitted useful signals are considered. The results of numerical experiments are presented.

Ключевые слова: распределенная система, обработка распределенных сигналов, пространственные фильтры.

Keywords: distributed system, distributed signal processing, spatial filters.

I. ВВЕДЕНИЕ

С восьмидесятых годов прошлого века активно начали развиваться методы анализа и синтеза систем с распределенными параметрами. Этому способствовало технологическое развитие производственных отраслей в которых стали востребованы системы управления процессами, изменяющимися не только во времени, но и в пространстве. В качестве примера могут служить про-

цессы, связанные с термической обработкой, диффузий, гидролитосферные процессы, электромагнитные и сейсмические поля. В литературе этот класс объектов (процессов) назван объектами с распределенными параметрами. В этом направлении работали многие научные школы, которым удалось решить важные задачи теории и практики проектирования распределенных систем управления [1–11]. Были исследованы распределенные объекты, обладающие оригинальными свойствами (получены математические модели распределенного хаоса и пространственных фильтров и сканеров [12]). Для исследования распределенных систем, потребовалось сформировать новое пространство $\{G, Re, Im\}$ которое позволило перейти от бесконечного набора частотных характеристик по собственным вектор-функциям оператора объекта (пространственных мод) к пространственным поверхностям [9–12]. Используя полученные пространственные поверхности, удалось сформулировать и доказать основные постулаты частотной методики синтеза систем с распределенными параметрами, и разработать аналитические методы синтеза распределенных регуляторов [13–23]. В последнее время уделяется большое внимание передаче и обработке информации. Можно выделить два новых направления, сформированных в последнее время: – направление, основанное на явлении самоорганизации в нелинейных системах с динамическим хаосом [24, 25]; – направление, основанное на использовании результатов исследований систем с распределенными параметрами [13, 26–31] и разработанных математических моделей распределенных объектов, обладающих оригинальными свойствами. Исследование работы пространственных сканеров и фильтров

и результаты натурных эксперименты, при малых возмущающих воздействиях, показаны в [9, 10]. Исследуем процессы в одномерной системе обработки информации при больших возмущающих воздействиях (амплитуда помехи в 500 раз больше амплитуды полезного сигнала).

II. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Как известно, решение математических моделей распределенных объектов может быть представлено совокупностью собственных вектор-функций оператора объекта (совокупностью пространственных мод [10]).

Математическая модель распределенного объекта, обладающего оригинальными свойствами [12] (одномерного пространственного фильтра) записывается в виде:

$$A \cdot \frac{\partial^2 T(x, z, \tau)}{\partial x^2} + T(x, z, \tau) + \frac{\partial^2 T(x, z, \tau)}{\partial z^2} = 0, \quad 0 < z < Z_L, \quad 0 < x < X_L, \quad (1)$$

где A – заданный параметр.

Границные условия для объекта (1) имеют вид:

$$T(x=0, z, \tau) = T(x=X_L, z, \tau) = 0, \quad \frac{\partial T(x, z=Z_L, \tau)}{\partial z} = U(x, \tau), \quad (2)$$

начальные условия полагаются нулевыми.

где $T(x, z, \tau)$ – фазовая переменная; $U(x, \tau)$ – входное воздействие (рис. 1).

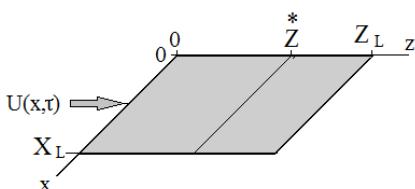


Рис. 1. Распределенный объект

Представляя входное воздействие в виде ряда Фурье попространственной координате (с учетом граничных условий (2)), получим:

$$U(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{C}_{\eta}(\tau) \cdot \sin(\Psi_{\eta} \cdot x), \quad \Psi_{\eta} = \frac{\pi \cdot \eta}{X_L}, \quad (3)$$

$\bar{C}_{\eta}(\tau)$ – заданные функции.

Коэффициент передачи ($K_{\eta} = T_{\eta}(x=\overset{*}{Z}, \tau) / (\bar{C}_{\eta}(\tau) \cdot \sin(\Psi_{\eta} \cdot x))$) по каждой пространственной моде определяется из следующего соотношения:

$$K_{\eta} = \frac{e^{\beta_{\eta} \overset{*}{Z}} + e^{-\beta_{\eta} \overset{*}{Z}}}{\beta_{\eta} \cdot (e^{\beta_{\eta} Z_L} - e^{-\beta_{\eta} Z_L})}, \quad \beta_{\eta} = (A \cdot \Psi_{\eta}^2 - 1)^{1/2}, \quad \eta = 1 \dots \infty. \quad (4)$$

Если $A=1/G_{\eta}$ (где $G_{\eta} = \Psi_{\eta}^2$) то $\text{abs}(K_{\eta}) \rightarrow \infty$.

Непрерывна функция G , охватывающая все дискретные значения Ψ_{η}^2 , ($\eta = 1, \infty$), названа обобщенной координатой [2, 3]. На рис. 2 показан график изменения $\text{abs}(K_{\eta})$ и схема настройки пространственных фильтров.

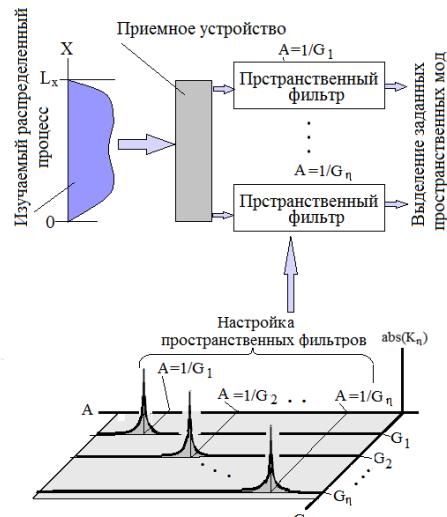


Рис. 2. Схема настройки пространственных фильтров

Рассматриваемая схема настройки может быть использована при отсутствии помех при передаче информации от изучаемого распределенного процесса к приемному устройству (см. рис. 2).

Математические модели пространственных фильтров различной мерности приведены в [9, 12].

Дискретная модель одномерного пространственного фильтра

Запишем уравнения (1)–(2) в дискретном виде. Схема дискретизации показана на рис. 3.

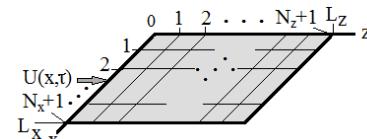


Рис. 3. Схема дискретизации

Положим, что число точек дискретизации по осям следующее:

по оси X ($0 \dots N_x+1$), граничные точки 0 и N_x+1 ;

Δx – шаг дискретизации по x;

по оси z ($0 \dots N_z+1$), граничные точки 0 и N_z+1 ;

Δz – шаг дискретизации по z.

Дискретная модель уравнений (1)–(2) может быть представлена в виде:

$$A \cdot \frac{T_{i-1,k} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i+1,k}}{\Delta x^2} + T_{i,k} + \frac{T_{i,k-1} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i,k+1}}{\Delta z^2} = 0, \quad i = \overline{1, N_x}, k = \overline{1, N_z}, \quad (5)$$

Учитывая граничные условия (2), получим:

$$T_{i,N_z+1} = T_{i,N_z}, \quad T_{0,k} = 0, \quad T_{N_x+1,k} = 0, \quad \frac{T_{i,0} - T_{i,1}}{\Delta z} = U_i \rightarrow T_{i,0} = U_i \cdot \Delta z + T_{i,1}.$$

Полагая $k=1$ и преобразуя (5), получим:

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,1} - 2 \cdot T_{i,1} + T_{i+1,1}) + T_{i,1} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot (U_i \cdot \Delta z + T_{i,1} - 2 \cdot T_{i,1} + T_{i,2}) = 0, \\ (i = 1 \dots N_x, k = 1),$$

или

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i-1,1} + (1 - \frac{2A}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta z^2}) \cdot T_{i,1} + \frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i+1,1} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot T_{i,2} = -\frac{1}{\Delta z} \cdot U_i, \quad (6)$$

($i = 1 \dots N_x$).

Полагая $1 < k < N_z$ и преобразуя (6), получим:

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,k} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i+1,k}) + T_{i,k} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot (T_{i,k-1} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i,k+1}) = 0, \\ (i = 1 \dots N_x, k = 2 \dots N_z - 1),$$

или

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i-1,k} + (1 - \frac{2A}{\Delta x^2} - \frac{2}{\Delta z^2}) \cdot T_{i,k} + \frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i+1,k} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot T_{i,k-1} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot T_{i,k+1} = 0, \quad (7)$$

($i = 1 \dots N_x, k = 2 \dots N_z - 1$).

Для $k = N_z$:

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,N_z} - 2 \cdot T_{i,N_z} + T_{i+1,N_z}) + T_{i,N_z} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot (T_{i,N_z-1} - T_{i,N_z}) = 0,$$

или

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i-1,N_z} + (1 - \frac{2A}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta z^2}) \cdot T_{i,N_z} + \frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i+1,N_z} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot T_{i,N_z-1} = 0, \quad (8)$$

$i = 1 \dots N_x, k = N_z$.

Полученные уравнения (6)–(8) описывают дискретную математическую модель одномерного пространственного фильтра. Представим рассматриваемую модель в матричном виде:

$$D \cdot X = U, \quad (9)$$

где D – блочная матрица; U – вектор входных воздействий; X – вектор функций выхода.

$$D = \begin{bmatrix} D_1^* & D_2 & 0 & \cdots & 0 \\ D_2 & D_1 & D_2 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & D_2 & D_1 & D_2 \\ 0 & \cdots & 0 & D_2 & D_1^* \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_z)}, \quad X = \begin{bmatrix} T_{1,1} \\ T_{1,2} \\ \vdots \\ T_{N_z, N_x-1} \\ T_{N_z, N_x} \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_z)}, \quad U = -1/\Delta z \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_{N_x} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_z)} \quad (10)$$

$$D_1^* = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & 0 & \cdots & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & C_2 & C_1 & C_2 \\ 0 & \cdots & 0 & C_2 & C_1 \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_x)}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} C_3 & C_2 & 0 & \cdots & 0 \\ C_2 & C_3 & C_2 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & C_2 & C_3 & C_2 \\ 0 & \cdots & 0 & C_2 & C_3 \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_x)} \quad (11)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_4 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_x)} \quad (12)$$

$$C_1 = (1 - \frac{2 \cdot A}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta z^2}), \quad C_2 = \frac{A}{\Delta x^2},$$

$$C_3 = (1 - \frac{2 \cdot A}{\Delta x^2} - \frac{2}{\Delta z^2}), \quad C_4 = \frac{1}{\Delta z^2}.$$

Преобразуя (9), получим:

$$X = D^{-1} \cdot U, \quad (13)$$

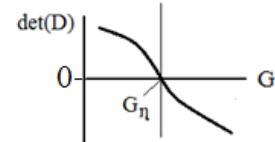


Рис. 4. Характер изменения $\det(D)$ в окрестности $A=G_\eta$

Матрица D^{-1} описывает дискретную модель одномерного пространственного фильтра. Если $\det(D) \rightarrow 0$, то $D^{-1} \rightarrow \infty$. Результаты исследований [13-15] показывают, что свойства дискретных моделей распределенных объектов существенно отличаются от свойств исходных непрерывных распределенных моделей.

Для непрерывных моделей, если $A=1/(G=\Psi_\eta^2)$, то для η пространственной моды $\text{abs}(K_\eta)=\infty$ (см.(4)). Для дискретной модели требуется корректировка параметров модели, чтобы при заданном значении параметра $A=1/G_\eta \det(D) \rightarrow 0$ ($\text{abs}(K_\eta) \rightarrow \infty$).

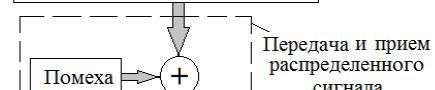
В рассматриваемом случае будем корректировку дискретной модели будем осуществлять, изменяя параметр Δz (шага дискретизации по координате z). Общая схема подготовки и обработки распределенного сигнала представлена на рис. 5, где $M_{\eta,\gamma}(\tau)$ – полезные сигналы, $\omega_{\eta,\gamma}$ – несущие частоты.

Формирование полезного сигнала

$$C_\eta(\tau) = M_{\eta,1}(\tau) \cdot \sin(\omega_{\eta,1}\tau) + \\ + M_{\eta,2}(\tau) \cdot \sin(\omega_{\eta,2}\tau) + \dots$$

Пространственная
модуляция
сигнала

$$U(x, \tau) = \sum_{i=1}^N C_\eta(\tau) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x), \\ \Psi_\eta = \frac{\pi \cdot \eta}{X_z}.$$



Пространственный
фильтр

Выделение заданной
пространственной моды
(магистрали
передачи
информации)

Пространственная
демодуляция
сигнала

Выделение полезного
сигнала

$M_{\eta,\gamma}(\tau) \dots$

Рис. 5. Общая схема подготовки и обработки распределенной информации

Подготовка распределенного сигнала к передаче и схема обработки принятого сигнала показана на рис. 6.

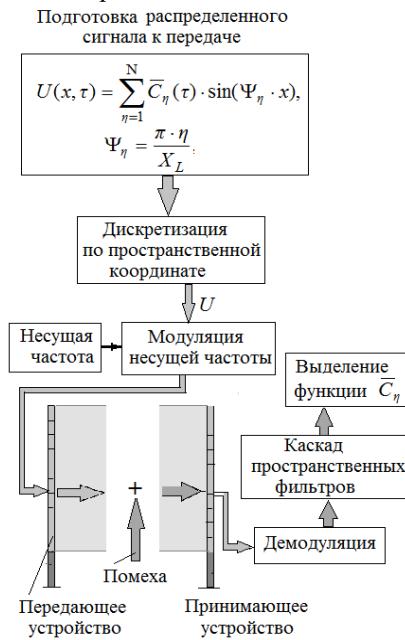


Рис. 6. Подготовка распределенного сигнала к передаче и схема обработки принятого сигнала

III. ПРИМЕР

Параметры дискретной модели одномерного пространственного фильтра были заданы в виде: $N_x=10$; $N_z=4$; $\Delta x=1$. Входное воздействие (14) сформировано в виде суммы семи пространственных мод (где $\bar{C}_\eta(\tau)$ – полезные сигналы).

$$U(x, \tau) = \sum_{\eta=1}^7 \bar{C}_\eta(\tau) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x), \quad \Psi_\eta = \frac{\pi \cdot \eta}{X_L},$$

$$\bar{C}_1(\tau) = \text{abs}(\sin(0.3 \cdot \tau));$$

$$\bar{C}_2(\tau) = 1 \text{ if } \sin(\tau) > 0, \text{ else } \bar{C}_2(\tau) = 0;$$

$$\bar{C}_3(\tau) = 2 - \sin(\tau); \bar{C}_4(\tau) = \sin(4 \cdot \tau); \bar{C}_5(\tau) = \sin(5 \cdot \tau); \quad (14)$$

$$\bar{C}_6(\tau) = \sin(6 \cdot \tau),$$

$$\text{if } \tilde{C}_6(\tau) > 0 \text{ then } \tilde{C}_6(\tau) = 1 \text{ else } \tilde{C}_6(\tau) = 0,$$

$$\bar{C}_6(\tau) = \sin(30 * t) * \tilde{C}_6(\tau);$$

$$\bar{C}_7(\tau) = \sin(7 \cdot \tau).$$

На вход пространственного фильтра (13) подается дискретный аналог входного воздействия (14). Была составлена программа вычисления значения определителя матрицы D, при изменении шага дискретизации по координате Δz. Фрагмент вычислений det(D), при изменении Δz, приведен в табл. 1. В результате вычислений, для выделения шестой пространственной моды ($A=1/\Psi_6^2 = 1/(\pi \cdot 6/L_x)^2$), получено: $\text{Det}(D)=0.00000098*10^{-9}$, при $\Delta z=0.770$. Используя вычисленные параметры, была определена матрица D^{-1} , описывающая дискретную модель одномерного пространственного фильтра.

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ DET(D) ДЛЯ МОДЫ 6

Δz	det(D)	$\text{det}(D) * 10^9$
0.763000	0.00000000	0.01437480
0.764000	0.00000000	0.00023123
0.765000	0.00000000	0.00000327
0.766000	0.00000000	0.00000004
0.767000	0.00000000	0.00000000
0.768000	0.00000000	0.00000000
0.769000	0.00000000	0.00000000
0.770000	0.00000000	0.00000000
0.771000	0.00000000	0.00000000
0.772000	0.00000000	0.00000000
0.773000	0.00000000	0.00000000
⋮	⋮	⋮
0.808000	0.00000000	0.00000000
0.809000	0.00000000	0.00000001
0.810000	0.00000000	0.00000002
0.811000	0.00000000	0.00000005
0.812000	0.00000000	0.00000010
0.813000	0.00000000	0.00000019

3.1. Рассмотрим решение поставленной задачи, когда отсутствует помеха ($f(x, \tau) = 0$).

$$\hat{U}(x, \tau) = U(x, \tau),$$

$$U(x, \tau) = \sum_{\eta=1}^7 \bar{C}_\eta(\tau) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x), \quad \Psi_\eta = \frac{\pi \cdot \eta}{X_L},$$

$$\bar{C}_1(\tau) = \text{abs}(\sin(0.3 \cdot \tau));$$

$$\bar{C}_2(\tau) = 1 \text{ if } \sin(\tau) > 0, \text{ else } \bar{C}_2(\tau) = 0;$$

$$\bar{C}_3(\tau) = 2 - \sin(\tau); \bar{C}_4(\tau) = \sin(4 \cdot \tau);$$

$$\bar{C}_5(\tau) = \sin(5 \cdot \tau); \bar{C}_6(\tau) = \sin(6 \cdot \tau),$$

$$\text{if } \tilde{C}_6(\tau) > 0 \text{ then } \tilde{C}_6(\tau) = 1 \text{ else } \tilde{C}_6(\tau) = 0,$$

$$\bar{C}_6(\tau) = \sin(30 * t) * \tilde{C}_6(\tau); \bar{C}_7(\tau) = \sin(7 \cdot \tau).$$

При решении практических задач используют несколько однотипных пространственных фильтров (Каскад пространственных фильтров) для качественного выделения информации, упакованной в заданную моду (магистраль). В рассматриваемом примере, для выделения шестой магистрали передачи информации, были использованы три однотипных фильтра (рис. 7), где U_0 – дискретный аналог функции $\hat{U}(x, \tau)$.

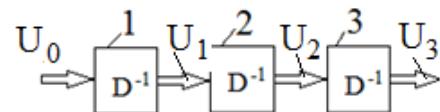


Рис. 7. Каскад пространственных фильтров

Используя результаты моделирования, на рис. 8, 9 построены графики $\bar{C}_6(\tau)$, $U_0(5, \tau)$, а так же функций выхода пространственных фильтров.

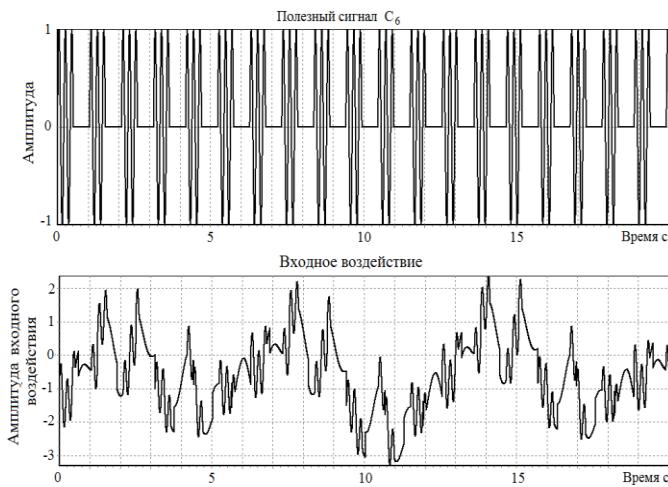


Рис. 8. графики полезного сигнала $\bar{C}_6(\tau)$ и входного воздействия на каскад пространственных фильтров $U_0(5, \tau)$

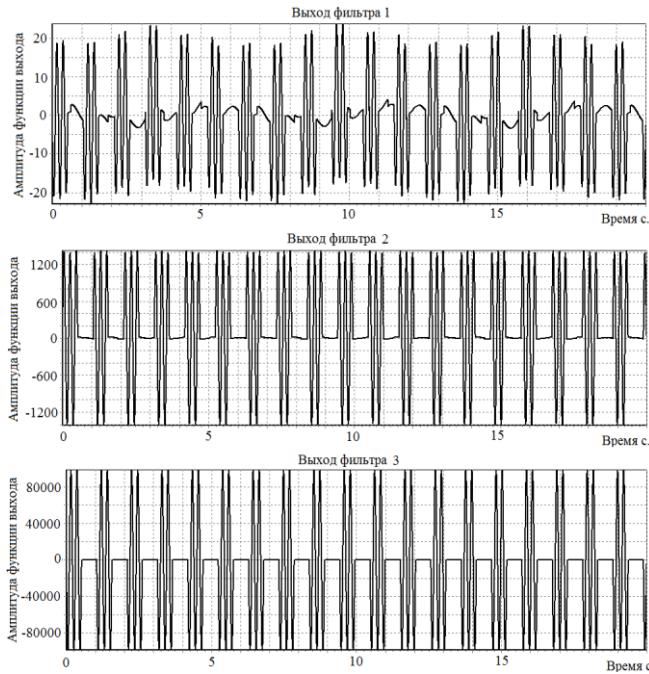


Рис. 9. графики функций выхода пространственных фильтров $U_i(15, \tau)$, $i=1,2,3$

3.2. Рассмотрим решение поставленной задачи, когда воздействует помеха ($f(x, \tau)$).

$$\hat{U}(x, \tau) = U(x, \tau) + f(x, \tau). \quad (14)$$

$$U(x, \tau) = \sum_{\eta=1}^7 \bar{C}_\eta(\tau) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x), \quad \Psi_\eta = \frac{\pi \cdot \eta}{X_L},$$

$$\bar{C}_1(\tau) = \text{abs}(\sin(0.3 \cdot \tau));$$

$$\bar{C}_2(\tau) = 1 \text{ if } \sin(\tau) > 0, \text{ else } \bar{C}_2(\tau) = 0; \quad \bar{C}_3(\tau) = 2 - \sin(\tau); \quad (15)$$

$$\bar{C}_4(\tau) = \sin(4 \cdot \tau); \quad \bar{C}_5(\tau) = \sin(5 \cdot \tau); \quad \bar{C}_6(\tau) = \sin(6 \cdot \tau),$$

$$\text{if } \tilde{C}_6(\tau) > 0 \text{ then } \tilde{C}_6(\tau) = 1 \text{ else } \tilde{C}_6(\tau) = 0,$$

$$\bar{C}_6(\tau) = \sin(30 * t) * \tilde{C}_6(\tau); \quad \bar{C}_7(\tau) = \sin(7 \cdot \tau).$$

$$f(x, \tau) = 500 \cdot \sin(500 \cdot \tau). \quad (16)$$

Как и ранее, будем использовать каскад пространственных фильтров (рис. 10), где U_0 – дискретный аналог функции $\hat{U}(x, \tau)$.

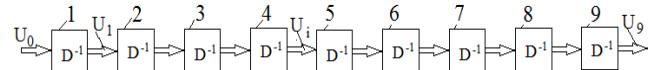


Рис. 10. Каскад пространственных фильтров по шестой пространственной моде ($\bar{C}_6(\tau) \cdot \sin(\Psi_6 \cdot x)$, $\Psi_6 = \frac{\pi \cdot 6}{X_L}$)

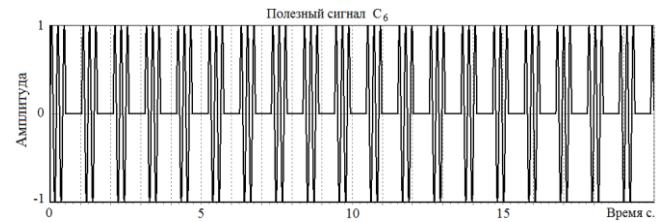


Рис. 11. График сигнала C_6

Используя вычисленную матрицу D^{-1} , выделим шестую магистраль передачи информации (сигнал C_6).

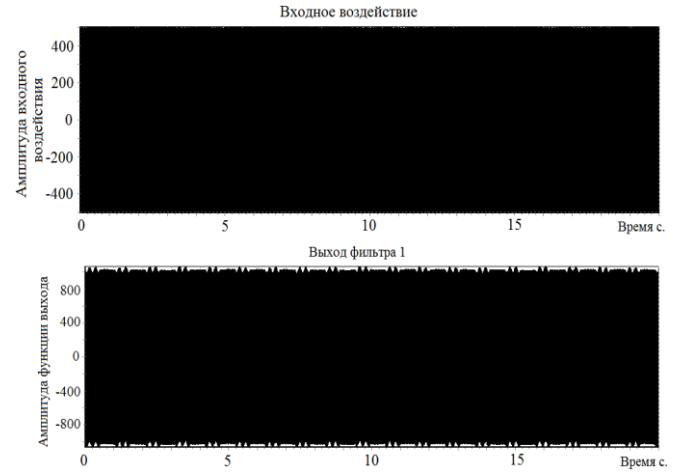


Рис. 12. График входного воздействия ($U_0(5, \tau) = U(5, \tau) + 500 \cdot \sin(500 \cdot \tau)$) и функции выхода пространственного фильтра $U_1(15, \tau)$

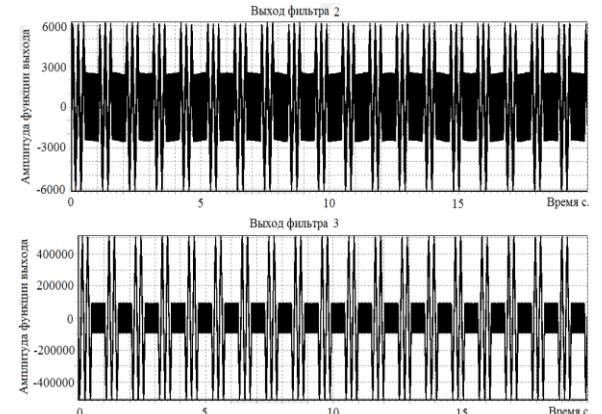


Рис. 13. графики функций выхода пространственных фильтров $U_2(15, \tau)$, $U_3(15, \tau)$

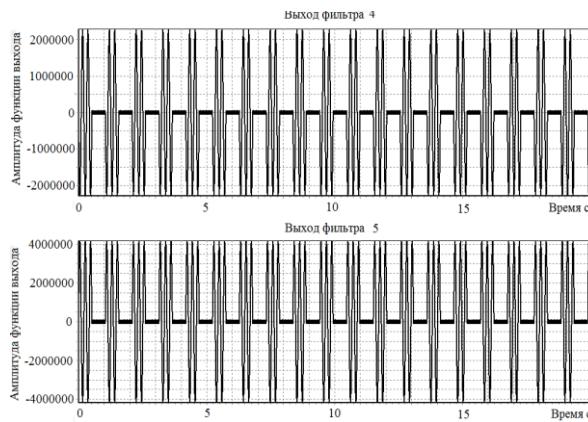


Рис. 14. графики функций выхода пространственных фильтров $U_4(15,\tau)$, $U_5(15,\tau)$

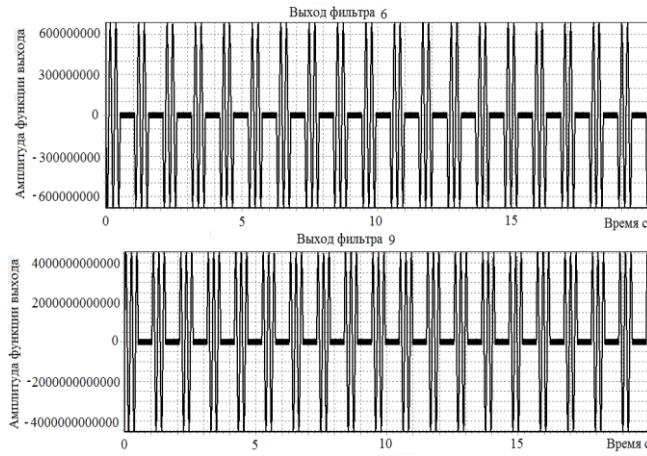


Рис. 15. графики функций выхода пространственных фильтров $U_6(15,\tau)$, $U_9(15,\tau)$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показывают эффективность использования пространственных фильтров, при выделении заданной магистрали передачи информации (заданной пространственной моды) при воздействии помехи, амплитуда которой в 500 раз больше амплитуды полезного сигнала. В рассматриваемом случае, были использованы поисковые процедуры определения значения параметра Δz (см. табл. 1.)

ЛИТЕРАТУРА

- Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
- Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1980. – 383 с.
- Коваль В.А. Спектральный метод анализа и синтеза распределенных управляемых систем. – Саратов: Сарат. Гос. Техн. ун-т, 1997. – 192 с.
- Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1977. – 479 с.
- Panoport Э.А. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
- Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 367 с.
- Desoer C.A., Wing J. The minimal time discrete system // J. Franklin Inst. – 1961. – Vol. 272, No. 3. – P. 208-228.
- Macfarlane A.G.I., and Postlethwaite I. The generalized Nyquist stability criterion and multivariable root loci. // Int. J. Control. – 1977. – Vol. 25, No. 1. – P. 81-127.
- Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.
- Першин И.М. Распределенные системы обработки информации. – Изд-во РИА КМВ, 2008. – 148 с.
- Першин И.М. Частотная концепция анализа и синтеза систем с распределенными параметрами. Отпечатано в типографии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Пятигорский институт (филиал) СКФУ, 2023. – 171 с.
- Першин И.М., Шестопалов М.Ю. Проектирование распределенных систем. Теория и практика. – 2-е изд., перераб. и дополни. Отпечатано в типографии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Пятигорский институт (филиал) СКФУ, 2023. – 252 с.
- Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 126-138.
- Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный Синтез и Прикладная Синергетика: Сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции (5–9 октября 2015 г., Россия, г. Таганрог). – Изд-во ЮФУ. ГСП 17А. – С. 106-117.
- Першин И.М., Носова В.А., Русак С.Н. Определение параметров распределенных звеньев, аппроксимирующих гидролитосферные процессы // Современная наука и инновации. Научный журнал. – 2021. – Вып. № 2 (34). – С. 10-16.
- Ivan M. Pershin, Elena G. Papush, Tatyana V. Kukharova,* and Vladimir A. Utkin. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral WaterWells. Water 2023 (Switzerland), 15, 2289. – <https://doi.org/10.3390/w15122289>. – 14 c.
- Першин И.М., Носова, В.А., Цаплева В.В. Самонастраивающиеся распределенные системы управления // Современная наука и инновации. Научный журнал. – 2023. – Вып. № 1 (41). – С. 16-29.
- Mir-Amal M. Asadulagi , Ivan M. Pershin and Valentina V. Tsapleva. Research on Hydrolithospheric Processes Using the Results of Groundwater Inflow Testing // Water. – 2024. – 16 (3), 487. – <https://doi.org/10.3390/w16030487> (registering DOI). – 16 c.
- Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V., Kukharova T.V. and Spivak A.O. Operational Control of Underground Water Exploitation Regimes // 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), St. Petersburg, Russia, 2019. – Р. 77-80. – DOI: 10.1109/CTS48763.2019.8973323.
- Першин И.М., Малков А.В., Помеляйко И.С. Проблемы экологической безопасности гидроминеральной базы курорта Кисловодска // Третий национальный форум «Нарзан - 2015». Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление): Сборник докладов. – Пятигорск, РИА КМВ, 2015. – 648 с. – С. 92-115.
- Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials // Journal of Physics: Conference Series. Открытый доступ. – January 2021. – Т. 1728. – Вып. 119. Номер статьи 0120172020 Annual International Conference on Complex Equipment and Quality Control Laboratories, CEQCL 2020, 14 April 2020 - 17 April 2020 ISSN 17426588. – DOI 10.1088/1742-6596/1728/1/012017.
- Дубогрей В.Ф, Малков А.В., Першин И.М. Методика синтеза распределенных систем управления режимами эксплуатации месторождений минеральных вод // Известия вузов. Геология и разведка. – 2012. – № 2. – С. 74-78.
- Першин И.М., Малков А.В., Криштал В.А. Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды в регионе КМВ // Современная наука и инновации. Научный журнал. – Изд-во ФГАОУ СКФУ, 2013. – Вып. № 1. – С. 17-21.
- Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Наука, 1987. – С. 288-304.
- Бабицкий В.И.Ланда. Автоколебательные системы с инерционным возбуждением // Динамика систем. – Горький: Изд-во ГГУ, 1983. – С. 147-181.
- Kukharova T.V.; Ilyushin Y.V.; Asadulagi M.-A.M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production // Energies. – 2022. – 15, 9001. – <https://doi.org/10.3390/en15239001>.

27. Martirosyan A.V., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Development of a Distributed Mathematical Model and Control System for Reducing Pollution Risk in Mineral Water Aquifer Systems (2022) Water (Switzerland), 14 (2), 151. – <https://doi.org/10.3390/w14020151>.
28. Eremeeva A.M., Ilyushin Y.V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels // Scientific Reports. – 2023. – 13, 14956. – <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41962-0>.
29. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С. Проблемы экологической безопасности гидроминеральной базы курорта Кисловодск // Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация): Сборник докладов. Редакционная коллегия: Бородавкин П.П., Малков А.В., Першин И.М. – 2015. – С. 92-116.
30. Першин И.М., Носова В.А., Малков А.В. Проектирование распределенных систем управления с использованием результатов экспериментальных исследований // XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сборник научных трудов. Издательско-полиграфический комплекс КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Ставки, 200/1, 2022. – 362 с. – DOI: 10.18522/syssyn-2022-42.
31. Першин И.М., Носова В.А., Цаплева В.В. Методика проектирования распределенных самонастраивающихся систем управления УДК 681.51 // V Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2023): Сборник докладов. Санкт-Петербург. 26 – 28 сентября 2023 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 298 с. – ISBN 978-5-7629-3236-3. СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 197022, С.-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5, лит. Ф.

Исследование современных проблем управления качеством бумаги по ширине полотна

Бахтин Андрей Владимирович

Институт энергетики и автоматизации

Высшая школа технологии и энергетики

Санкт-Петербургский государственный университет

промышленных технологий и дизайна

Санкт-Петербург, Россия

bahtin73@mail.ru

Слюта Марина Олеговна

Институт энергетики и автоматизации

Высшая школа технологии и энергетики

Санкт-Петербургский государственный университет

промышленных технологий и дизайна

Санкт-Петербург, Россия

marina_slyuta@mail.ru

Аннотация. Управление процессом производства бумаги – одна из сложнейших задач автоматизации технологических процессов, в которой ключевым объектом является бумагоделательная машина. Создание и отладка систем управления таким сложным объектом, с большим количеством взаимосвязанных параметров, является результатом многолетнего опыта ряда западных фирм. Однако, в последнее время возникли проблемы с поставками оборудования, комплектующих и программного обеспечения зарубежных производителей, что ставит задачу анализа их логистической доступности и возможностей перехода на отечественные аналоги этого оборудования. Данная работа посвящена оценке рисков для бумагоделательного производства при использовании существующего оборудования и программного обеспечения.

Abstract. Paper production process control is one of the most complex tasks of process automation, in which the key object is a paper-making machine. The creation and debugging of control systems for such a complex object, with a large number of interrelated parameters, is the result of many years of experience of a number of Western firms. However, recently there have been problems with the supply of equipment, components and software from foreign manufacturers, which poses the task of analyzing their logistical availability and the possibility of switching to domestic analogues of this equipment. This work is devoted to assessing the risks for paper production when using existing equipment and software.

Ключевые слова: бумагоделательные машины, системы управления, качество бумаги, управление в поперечном направлении, управление объектом с распределенными параметрами, импортозамещение.

Keywords: paper machines, control systems, paper quality, cross-direction control, distributed parameter object control, import substitution.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях производства бумажной продукции обеспечение высокого и стабильного качества является одним из ключевых факторов конкурентоспособности. Сложность и многогранность технологического процесса изготовления бумаги требуют внедрения эффективных систем управления, способных оперативно реагировать на изменения параметров производства и поддерживать оптимальные условия для достижения заданных характеристик продукции. Одним из важных

аспектов такого управления является контроль показателей качества бумаги в поперечном направлении (Cross Direction, CD), который позволяет гарантировать однородность и стабильность массы, толщины и влажности бумаги по всей ширине полотна [1].

Системы управления показателями качества бумаги в поперечном направлении включают в себя множество взаимосвязанных компонентов, таких как датчики, сканеры и исполнительные механизмы. Для эффективного функционирования таких систем необходимы точные математические модели, которые описывают динамику изменения параметров бумаги и позволяют прогнозировать их поведение при различных воздействиях. Разработка таких моделей требует глубокого понимания физико-химических процессов, происходящих в бумажной массе, а также умения формализовать эти процессы в виде математических уравнений и алгоритмов [2].

Актуальность данной проблемы обусловлена потребностью в повышении эффективности и точности существующих систем управления качеством бумаги. Современные производственные линии требуют высокоскоростных и точных систем контроля, которые способны минимизировать отклонения от заданных параметров, что приведет к снижению количества брака. Разработка и внедрение новых математических моделей позволит улучшить прогнозирование и корректировку параметров в реальном времени, что приведет к значительному повышению качества конечной продукции.

II. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ БУМАГИ

Для поддержания всех необходимых параметров качества бумаги в установленных значениях существует сложная система «CD-control». На рис. 1 приведена система управления качеством бумаги по ширине полотна в общем виде.

Управление в поперечном направлении системой «CD-control» включает в себя такие задачи, как: управление весом, влажностью и толщиной.

Система управления весом регулирует профиль верхней губы напорного ящика, выполненной из стальной полосы, которая разделена на зоны при помощи линейных шаговых двигателей, работающих за счёт давления воздуха, подаваемого с компрессора.

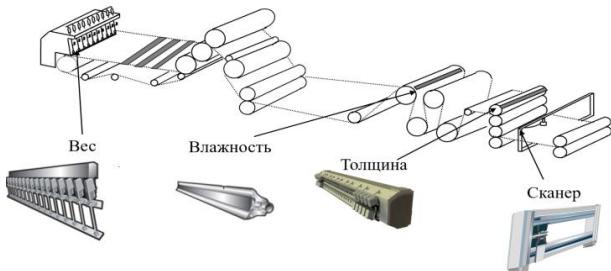


Рис. 1. Система управления качеством бумаги по ширине полотна

Принцип работы системы управления влажностью заключается в регулировании увлажнения в каждой зоне бумажного полотна, путем изменения расхода воды и давления воздуха в водовоздушных спрысках увлажняющей балки.

Толщина бумаги регулируется за счет нагрева каландрового вала отдельно в выделенных зонах электрическими грееками. Через все грееки под давлением продувается воздух, который либо нагревается, если греека включена, либо остаётся холодным. При обдуве какой-либо зоны каландрового вала горячим воздухом, происходит небольшое увеличение диаметра вала в данной зоне, и как следствие увеличение давления на бумагу.

Одной из главных частей системы «CD-control» является сканирующее устройство, движущееся поперёк бумажного полотна. На подвижных головках сканера расположены датчики для измерения основных параметров: вес 1 м^2 , влажность и толщина бумажного полотна [3].

В зависимости от компаний, которые производят системы управления качеством бумаги количество исполнительных механизмов по ширине полотна, а также их конструкции и алгоритмы действия могут отличаться.

В настоящее время на рынке известны несколько компаний, которые производят системы управления бумагоделательными машинами: швейцарская компания «Asea Braun Boveri» (ABB), финский производитель технологического оборудования «Valmet», знаменитая американская корпорация «Honeywell International» [4].

III. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ БУМАГИ

Компания Valmet является одним из ведущих производителей автоматизированных систем управления качеством бумажного полотна. Данные системы отличаются высоким уровнем автоматизации, точностью и надежностью. На рис. 2 приведен пример экрана системы управления профилями бумажного полотна фирмы Valmet.

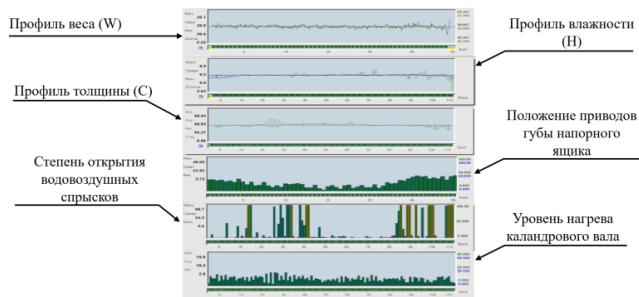


Рис. 2. Пример экрана системы управления профилями бумажного полотна фирмы Valmet

Однако, как и любые сложные технические решения, системы управления качеством компании Valmet имеют свои недостатки, которые влияют на их внедрение и эксплуатацию.

Для успешного внедрения и работы системы Valmet необходимо наличие современной и технически оснащенной производственной инфраструктуры. Это может включать в себя:

- Обновление или замену существующего оборудования для обеспечения совместимости с системой управления.
- Обеспечение надежной сетевой инфраструктуры для передачи данных.
- Создание резервных систем электроснабжения для обеспечения непрерывной работы системы.

Данные требования могут вызвать значительные капитальные затраты для предприятий, особенно тех, которые используют устаревшее оборудование.

Процесс внедрения системы управления качеством Valmet может быть длительным и сложным, включая несколько этапов:

- Подготовительный этап: анализ текущих процессов, выбор оборудования и разработка плана внедрения.
- Установка и настройка оборудования: монтаж датчиков, контрольных систем и интеграция с существующими производственными линиями.
- Тестирование и калибровка: проверка работоспособности системы и настройка параметров для достижения оптимальных результатов.
- Обучение персонала: проведение тренингов для операторов и технического персонала.

Все эти этапы могут занимать значительное время и требуют тесного сотрудничества между разработчиками системы и персоналом предприятия.

Системы Valmet также требуют регулярного технического обслуживания для обеспечения точности и надежности работы:

- Периодическое обслуживание датчиков и контроллеров.
- Обновление программного обеспечения и установка новых версий.

Данные действия требуют дополнительных затрат на персонал и расходные материалы, что увеличивает общие эксплуатационные расходы.

Внедрение системы Valmet может требовать интеграции с уже существующими автоматизированными системами управления производством и качеством. Возможные проблемы включают:

- Несовместимость программного обеспечения и оборудования.
- Необходимость разработки дополнительных интерфейсов и модулей для обеспечения обмена данными между системами.

- Потенциальные проблемы с синхронизацией данных и координацией работы различных систем.

Данные проблемы могут требовать значительных временных и финансовых затрат для их решения.

Использование систем Valmet предполагает зависимость от производителя в вопросах технической поддержки, обновлений и поставки запасных частей. Возможные риски включают:

- Долгое время ожидания поставки запчастей и компонентов.
- Высокие расходы на техническую поддержку и консультации.
- Ограниченные возможности самостоятельного ремонта и обслуживания системы.
- В условиях санкций и ограничений невозможная поставка оборудования.

Компания ABB (Asea Brown Boveri) также является одной из ведущих мировых компаний в области автоматизации и электроэнергетики, предлагая передовые решения для управления качеством бумаги. На рис. 3 приведен пример экрана системы управления профилями бумажного полотна фирмы ABB.

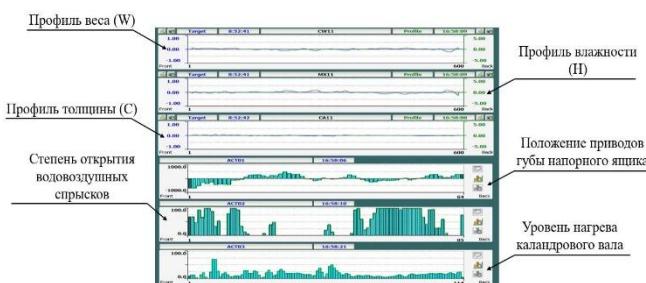


Рис. 3. Пример экрана системы управления профилями бумажного полотна фирмы ABB

Однако, несмотря на высокие технологические стандарты и надежность, системы управления качеством бумаги ABB имеют свои недостатки. Рассмотрим их более подробно.

Системы управления качеством бумаги ABB требуют значительных первоначальных инвестиций. Это включает:

- Закупку дорогостоящего оборудования и программного обеспечения.
- Услуги по установке и настройке системы.
- Переоборудование существующих производственных линий для интеграции новых систем.

Для небольших и средних предприятий такие инвестиции могут оказаться слишком обременительными и требующими длительного периода окупаемости.

Внедрение системы управления качеством ABB может потребовать интеграции с уже функционирующими автоматизированными системами на предприятии. Возможные сложности включают:

- Необходимость создания дополнительных интерфейсов для взаимодействия с существующими системами управления производством и качеством.
- Проблемы совместимости с оборудованием других производителей.
- Затраты времени и ресурсов на разработку и тестирование интеграционных решений.

Эти факторы могут привести к задержкам и дополнительным расходам при внедрении новой системы.

Системы ABB требуют для эксплуатации и обслуживания высококвалифицированного персонала:

- Специалистов по автоматизации и ИТ.
- Инженеров по техническому обслуживанию.
- Операторов производственных линий, прошедших специальное обучение.

Требования к квалификации персонала могут привести к необходимости дополнительных инвестиций в обучение и повышение квалификации сотрудников.

Поддержка и обслуживание систем управления качеством ABB требуют регулярных затрат, включая:

- Периодическое техническое обслуживание и калибровку оборудования.
- Обновление программного обеспечения и покупку лицензий.
- Замена изношенных компонентов и закупка расходных материалов.

Эти расходы могут существенно увеличивать общие эксплуатационные затраты на систему.

Несмотря на высокую функциональность, системы ABB могут быть ограничены в плане гибкости и настройки под специфические нужды конкретного производства. Возможные ограничения включают:

- Ограниченные возможности кастомизации программного обеспечения.
- Необходимость адаптации производственных процессов под стандартные параметры системы.
- Сложности при внесении изменений и доработок в конфигурацию системы без участия специалистов ABB.

Это может затруднить адаптацию системы под уникальные требования и условия конкретного предприятия.

Использование системы управления качеством бумаги ABB приводит к зависимости от поставщика в вопросах технической поддержки, обновлений и поставки запчастей. Возможные риски включают:

- Задержки в поставках необходимых компонентов.
- Высокие затраты на техническую поддержку и консультации.
- Ограниченные возможности для самостоятельного ремонта и модернизации системы.

Эти факторы могут влиять на надежность и бесперебойность работы производственного процесса.

Компании, такие как Valmet, ABB и Honeywell, широко известны благодаря разработке систем управления, специально предназначенные для бумагоделательных машин. Однако существует множество других компаний, которые поставляют системы управления и оборудование для различных технологических процессов на предприятия различных отраслей, но они не ориентированы исключительно на бумагоделательные комбинаты.

Фирмы, такие как Siemens AG, Yokogawa Electric Corporation, Schneider Electric, Emerson являются примерами поставщиков, которые разрабатывают системы управления и оборудование для широкого спектра технологических процессов на различных предприятиях. Эти компании предоставляют решения для таких отраслей, как энергетика, нефтегазовая промышленность, химическая промышленность, производство продуктов питания и напитков, и многие другие.

Siemens AG – одна из крупнейших в мире инженерных компаний, базирующаяся в Германии, основанная в 1847 году. Siemens предоставляет широкий спектр решений в различных областях, таких как энергетика, автоматизация, цифровизация и медицинские технологии. Компания известна своими передовыми технологиями и инновациями, направленными на повышение эффективности и производительности.

Основные продукты и решения компании:

- Siemens предлагает комплексные решения для автоматизации промышленных процессов, включая программируемые логические контроллеры (PLC), распределенные системы управления (DCS) и программное обеспечение для управления производством.
- Siemens производит широкий ассортимент электроприводов и двигателей для промышленного применения, обеспечивая надежность и энергоэффективность.
- Siemens предлагает решения для управления и оптимизации энергопотребления на предприятиях, включая системы распределения электроэнергии и управления микросетями.
- Siemens активно внедряет цифровые технологии и решения для Интернета вещей (IoT), обеспечивая интеграцию данных и управление производственными процессами в реальном времени.

Можно выделить основные преимущества продуктов и решений Siemens AG:

- Продукты Siemens известны своей надежностью и качеством, что делает их предпочтительным выбором для предприятий.
- Siemens активно внедряет инновационные технологии, включая цифровизацию и IoT, что позволяет улучшать производственные процессы и повышать их эффективность.

- Широкий ассортимент продуктов и решений позволяет Siemens предлагать комплексные решения для автоматизации и управления, адаптированные под конкретные нужды клиентов.
- Предопределенный пользовательский интерфейс системы управления имеет все типовые элементы систем управления процессом. Интерфейс является многоязычным, хорошо структурированным и ясным для понимания. Операторы могут легко обозревать весь процесс, быстро переключаться между различными видами секций завода. Система поддерживает иерархическую структуру всей установки, которая может конфигурироваться в соответствии с заявленными требованиями. Такая структура облегчает оператору прямой выбор различных секций в процессе управления. На рис. 4 приведен пример экрана системы управления фирмы Siemens AG.

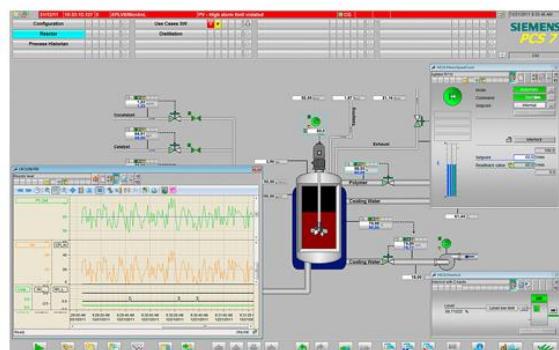


Рис. 4. Пример экрана системы управления фирмы Siemens AG

Недостатки данной компании:

- Продукты и решения Siemens могут быть достаточно дорогостоящими, что может стать препятствием для их внедрения на небольших предприятиях.
- Интеграция систем Siemens с существующими решениями может потребовать значительных усилий и ресурсов, особенно если используются продукты других производителей.
- Для эффективного использования и обслуживания систем Siemens требуется наличие высококвалифицированных специалистов, что может потребовать дополнительных затрат на обучение и подготовку персонала.
- Несмотря на то, что компания предоставляет обширную сеть поддержки и сервисного обслуживания по всему миру, в настоящее время в условиях ограничений и санкций оперативное решение возникающих проблем на предприятиях невозможно.

Yokogawa Electric Corporation – это японская компания, основанная в 1915 году, которая является одним из ведущих мировых поставщиков промышленных автоматизированных систем. Yokogawa предоставляет широкий спектр продуктов и услуг для автоматизации и контроля процессов в различных отраслях, включая нефтегазовую, химическую, энергетическую и фармацевтическую промышленность.

Основные продукты и решения компании:

- Yokogawa предлагает передовые распределенные системы управления (DCS) для автоматизации и оптимизации промышленных процессов.
- Системы управления безопасностью Yokogawa предназначены для обеспечения безопасности и предотвращения аварийных ситуаций на промышленных предприятиях.
- Yokogawa производит широкий ассортимент контрольно-измерительных приборов для различных промышленных применений.
- Компания занимается разработкой программного обеспечения управления и мониторинга состояния оборудования на промышленном предприятии.

Преимущества Yokogawa Electric Corporation:

- Продукты Yokogawa известны своей высокой надежностью и соответствием строгим стандартам безопасности, что делает их подходящими для крупных и сложных промышленных объектов.
- Системы управления Yokogawa легко интегрируются друг с другом и могут быть масштабированы для различных промышленных объектов.
- Yokogawa активно внедряет инновационные технологии и решения, такие как передовые методы измерения и цифровизация, что способствует повышению эффективности и точности производственных процессов, а также интуитивно понятный пользовательский интерфейс систем управления для облегчения работы персонала. На рис. 5 приведен пример экрана сенсорной панели фирмы Yokogawa Electric Corporation.

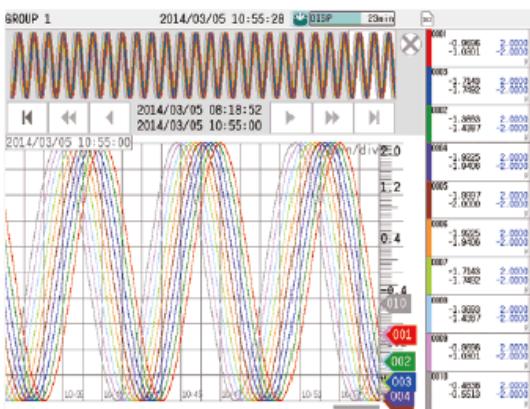


Рис.5. Пример экрана сенсорной панели фирмы Yokogawa Electric Corporation

Недостатки данной компании:

- Продукты и решения Yokogawa могут быть достаточно дорогостоящими, что может стать препятствием для их внедрения на небольших предприятиях.
- Интеграция систем Yokogawa с уже установленными решениями других производителей может потребовать дополнительных усилий и ресурсов.

- Для эффективного использования и обслуживания систем Yokogawa требуется наличие высококвалифицированных специалистов, что может потребовать дополнительных затрат на обучение и подготовку персонала.

Системы управления, разработанные представленными выше компаниями, также могут быть интегрированы в процессы бумажных комбинатов. Тем не менее, ввиду отсутствия узкой специализации на бумажном производстве, их решения менее востребованы в данной отрасли. Более того, стоит учитывать, что не все системы управления данных компаний способны обеспечивать эффективное функционирование широких и высокоскоростных бумагоделательных машин, что ограничивает их применение в бумажной промышленности.

В условиях ограничений и санкций, введенных западными странами, особую популярность приобрели китайские производители. В современных условиях многие китайские компании активно развиваются и реализуют системы управления и оборудование. Однако существенным недостатком является то, что данные компании предлагают системы управления исключительно со своим оборудованием, что значительно увеличивает стоимость всей системы. Руководство целлюлозно-бумажных комбинатов обеспокоено необходимостью дополнительных затрат на оборудование, которое уже имеется в наличии.

Также вызывает опасение замена систем управления на системы другого производителя на таких сложных объектах, как бумагоделательные машины, так как в случае осложнений в процессе реорганизации предприятия, останов производство на длительное время может привести к значительным финансовым потерям.

Однако в последнее время среди поставщиков систем управления выделяется китайская компания HollySys Automation Technologies, которая стала поставлять на Российские предприятия системы управления, имеющие возможность интегрироваться с установленными системами и оборудованием.

HollySys Automation Technologies – ведущий поставщик решений в области автоматизации и управления процессами. Компания была основана в 1993 году и базируется в Китае, предлагая широкий спектр продуктов и услуг для различных отраслей промышленности, включая энергетику, химию, транспорт и производство.

В качестве основных продуктов и решений компания предлагает системы управления технологическими процессами (DCS), программируемые логические контроллеры (PLC).

Можно выделить следующие преимущества компании HollySys Automation Technologies:

- Системы HollySys разработаны с учетом высоких требований к надежности и безопасности, что делает их подходящими для использования на высокотехнологичных объектах.
- Компания активно внедряет передовые технологии и инновационные решения, обеспечивая высокую производительность и эффективность своих продуктов.

- Модульная архитектура систем позволяет легко адаптировать и расширять решения в зависимости от конкретных потребностей клиентов.
- HollySys предлагает широкий ассортимент решений для различных отраслей, что позволяет выбирать оптимальные продукты для конкретных задач автоматизации и управления.

Однако, у данной компании имеются недостатки:

- Некоторые системы и решения HollySys могут быть достаточно дорогостоящими, что может стать препятствием для их внедрения на небольших предприятиях.
- Интеграция систем HollySys с существующими решениями может потребовать дополнительных усилий и ресурсов, особенно в условиях уже установленных систем автоматизации других производителей.
- Для эффективного использования и обслуживания систем HollySys требуется наличие высококвалифицированных специалистов, что может потребовать дополнительных затрат на обучение и подготовку персонала [5].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы управления качеством бумаги по ширине полотна играют ключевую роль в обеспечении высокого уровня продукции и минимизации дефектов. Современные системы западных производителей используют передовые технологии и алгоритмы, обеспечивая точный контроль и корректировку параметров производства. Тем не менее, их внедрение и эксплуатация сопряжены с рядом проблем, включая высокие затраты, сложность

интеграции и необходимость квалифицированного персонала. В условиях действующих санкций и ограничений самостоятельное обслуживание данных систем становится невозможным, поскольку все алгоритмы зашифрованы производителями. Приобретение систем управления китайских производителей также не всегда является финансово выгодным решением, что подчеркивает актуальность проблемы импортозамещения.

На данный момент на российском рынке отсутствуют системы управления бумагоделательных машин, что создает значительные препятствия для развития отечественной промышленности в данной области. Данная ситуация требует поддержки отечественных производителей и инвестиций в развитие технологий. Решение данной проблемы позволит повысить эффективность и конкурентоспособность российских предприятий на мировом рынке бумаги.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ohenoja M., Leiviska K. Multiple Cross Direction Control of Paper Machines // Modeling, Identification and Control.* – 2011. – 32:3. – P. 103-112.
2. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 2. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства бумаги и картона. – СПб.: Политехника, 2005. – 423 с.
3. *Bakhtin A., Slyuta M. Improvement of Paper Quality Management System by Web Width on the Basis of Intellectual Technologies // Proceedings of 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS).* – St. Petersburg, Russia, 2023. – P. 46-49.
4. *Bakhitin A.B. Развитие системы управления показателями качества бумажного полотна на базе нейросетевых технологий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.07. – СПбГТУРП – СПб., 2000. – 154 с.*
5. Hollysys. PRODUCTS AND SOLUTIONS. – URL: <https://www.hollysys.com/cms/list-15.html> (дата обращения: 10.07.2024). – Текст : электронный.

Алгоритмы автоматического и оптимального управления температурным режимом несущих конструкций мобильного объекта

Лившиц Михаил Юрьевич
 Теплоэнергетический факультет
 Самарский государственный
 технический университет
 Самара, Россия
 mikhaillivshits@gmail.com

Бородулин Борис Борисович
 Теплоэнергетический факультет
 Самарский государственный
 технический университет
 Самара, Россия
 borodulinbb@gmail.com

Нигматуллин Руфит Минрафисович
 Теплоэнергетический факультет
 Самарский государственный
 технический университет
 Самара, Россия
 nigmatullinrufit@gmail.com

Аннотация. Решена актуальная задача обеспечения размерной стабильности неравномерно теплонагруженных несущих конструкций мобильных объектов. Для снижения уровня термодеформаций, вызывающих искажения измерительной информации от расположенной на конструкции информационно измерительной аппаратуры, предложен алгоритм оптимального управления мощностью локальных управляемых нагревателей, размещенных в зоне сечения несущей конструкции, ответственного за наиболее существенную термодеформационную составляющую погрешности измерений. Разработанный алгоритм обладает высокой эффективностью при минимальном количестве управляемых нагревателей.

Abstract. The urgent problem of ensuring dimensional stability of non-uniformly heat-loaded supporting structures of mobile objects has been solved. To reduce the level of thermal deformations causing distortions of measuring information from information-measuring equipment located on the structure, an algorithm for optimal control of the power of local controlled heaters located in the zone responsible for the most significant thermal deformation component of the measurement error in the cross-section of the supporting structure has been proposed. The developed algorithm has high efficiency with a minimum number of controlled heaters.

Ключевые слова: мобильные объекты, термодеформация, оптимальный алгоритм управления, автоматическое управление.

Keywords: Mobile objects, thermal deformation, optimal control algorithm, automatic control.

I. ВВЕДЕНИЕ

Большинство несущих конструкций (НК) мобильных объектов (МО), на которых размещена информационно-измерительная система (ИИС), подвержены тепловым нагрузкам со стороны внешней среды и работающей аппаратуры. Из-за неравномерного распределения температуры по НК происходит ее термодеформация [1–3]. Сохранение стабильного размерного состояния НК путем обеспечения равномерного распределения температуры в ней с помощью системы автоматического обеспечения теплового режима (САОТР), включающей размещенные на поверхности НК управляемые источники

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

тепла (УИТ), является важной и актуальной задачей, так как термодеформации искажают достоверность информации размещенных на НК приборов, особенно оптических, что может привести к тяжелым авариям.[1–3, 6].

II. ПРОСТЕЙШИЙ ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ НК

На рис. 1 представлен предложенный авторами [4] простейший обобщённый алгоритм работы САОТР с регулятором переменной структуры, реализующим в режиме реального времени, в зависимости от величины рассогласования релейный и пропорционально-интегральный (ПИ) законы регулирования температуры НК в точках ее контроля датчиками – термосопротивлениями, расположенными на одной подложке с УИТ.

В каждый j -ый момент времени τ_j , производится вычисление максимальной температуры $T_{max}(\tau_j)$ в точках контроля на поверхности НК. Сигнал с датчиков температуры поступает в управляющее устройство (УУ), в котором на каждом i -ом шаге вычисляется величина рассогласования $\Delta T_s(\tau_j) = T_{max}(\tau_j) - T_s(\tau_j)$ между максимальной температурой $T_{max}(\tau_j)$ среди всех N точек контроля поверхности НК в каждый j -й момент времени и температурой в s -й точке контроля $T_s(\tau_j)$, $s = \overline{1, N}$. Это рассогласование $\Delta T_s(\tau_j)$ сравнивается с пороговым значением температуры T_n , которое определяет переключение регулятора между релейным и ПИ-законом регулирования. Если $\Delta T_s(\tau_j) > T_n$, то работает релейная часть регулятора температуры $T_s(\tau_j)$, формирующая в соответствующей зоне s -го регулятора максимальную мощность $P_s(\tau_j) = P_{max}^{js}$ на s -м элементе УИТ. Если $\Delta T_s(\tau_j) \leq T_n$, то значение $\Delta T_s(\tau_j)$ участвует в формировании дискретного ПИ-закона регулирования с шагом дискретизации $\Delta \tau_j$. Мощность $P_s(\tau_j)$ элементов УИТ ограничивается энергетическими и массогабаритными условиями:

$$0 \leq P_s(\tau_j) \leq P_{max}, \quad (1)$$

где P_{max} максимально допустимое значение мощности УИТ.

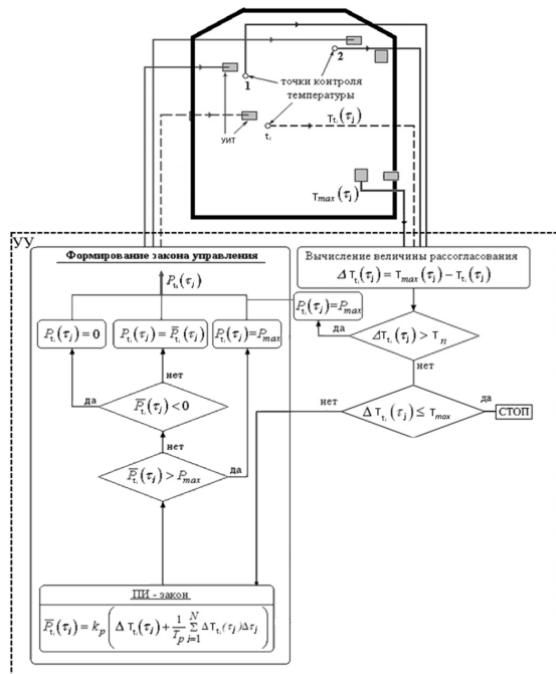


Рис. 1. Простейший обобщённый алгоритм работы подсистемы управления температурой НК ИИС МО с ПИД-регулятором

В управляющем устройстве УУ формируется уровень рабочей мощности $P_s(\tau_j)$ каждого s-го элемента УИТ, в зависимости от значения $\Delta T_s(\tau_j)$. При достижении температурой $T_s(\tau_j)$ зоны нечувствительности T_{min} процесс регулирования останавливается.

III. НЕПРЕРЫВНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТЕРМОГРАДИЕНТНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Предложенный простейший алгоритм работы подсистемы управления, несмотря на очевидные преимущества, связанные с простотой реализации и экономией бортовых вычислительных ресурсов, обладает существенными недостатками.

Этот алгоритм не позволяет достаточно гибко реагировать на возмущения, компенсируя термоградиенты по объему НК. Кроме того, он не содержит служебных вспомогательных функций, обеспечивающих надежность эксплуатации САОТР. С целью решения этих проблем предложен непрерывный алгоритм автоматической термоградиентной стабилизации (АТСТ) НК ИИС МО, который использует пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон) регулирования распределения температуры по НК [4, 5]. Основными достоинствами алгоритма являются:

- непрерывное изменение мощности УИТ, что снижает вероятность резкого изменения температуры и повышает износостойкость НК;
- снижение динамической ошибки регулирования;
- снижение времени регулирования;
- учет ограничений на максимально допустимую температуру НК.

В алгоритме определяется переменное задающее воздействие $T_{spec}(\tau)$ для локальных систем автоматического управления (САУ) температурой НК ИИС МО, вирту-

альные регуляторы которых реализуют ПИД-закон регулирования. Задающее воздействие $T_{spec}(\tau)$ изменяется в зависимости от текущей максимальной температуры НК, в условиях ограничений на максимально и минимально допустимые температуры НК

$$T_{min} \leq T_s(\tau_j) \leq T_{max}. \quad (2)$$

Управляющее воздействие, формируемое регулятором, поступает на УИТ дискретно изменяя его мощность в зависимости от значения температуры $T_s(\tau_j)$ в текущий момент времени τ_j .

Исходной информацией для работы алгоритма являются:

- допустимый диапазон изменения температуры НК, $T_{min} \div T_{max}$;
- параметры настройки j-го ПИД-регулятора – $K_j^{PID}, T_{u,j}^{PID}, T_{d,j}^{PID}$;
- общее число шагов работы алгоритма n (дискретность шага работы $i = 1, 2, \dots, n$);
- количество N датчиков температуры – контрольных точек, или УИТ НК (дискретность опроса датчика температуры и/или УИТ НК $j = 1, 2, \dots, N$);
- мощность $P_{1,j}$ УИТ на первом шаге (обычно $P_{1,j} = 0$).

Выходной информацией алгоритма являются:

- признак работоспособности датчика температуры;
- признак работоспособности УИТ;
- показания датчиков температуры $T_{i,j}(\tau_j)$;
- текущие значения подключенной мощности УИТ $P_{i,j}$.

1. Встроенная диагностика

Встроенная диагностика АТСТ обеспечивает проверку исправности средств контроля температуры (рис. 2, 3). Проверка базируется на использовании цепи с ненулевым начальным значением токового сигнала, что позволяет идентифицировать ее обрыв. При обнаружении обрыва, соответствующая пара элементов (датчик температуры и УИТ) из опроса исключается, что обеспечивает сохранение работоспособности алгоритма.

При устранении неисправности датчика, УИТ или канала связи, происходит автоматический возврат соответствующих элементов в рабочий режим алгоритма.

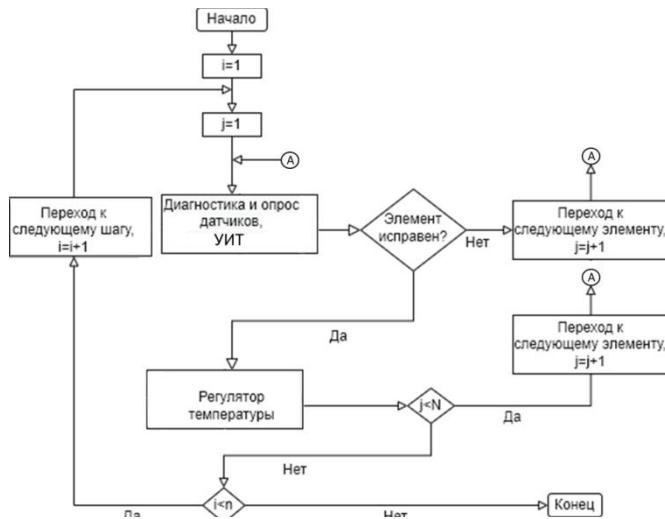
2. Опрос датчиков и определение максимальной температуры НК.

2.1. Температура j-го датчика $T_{i,j}$ запоминается в соответствующем массиве в оперативной памяти бортового микроконтроллера.

2.2. Проверка на выход из цикла опроса датчиков:

2.2.1. Если опрошен последний датчик $j = N$, то осуществляется переход к шагу 2.3 алгоритма.

2.2.2. Если номер j текущего датчика меньше номера N последнего датчика $j < N$, то опрашивается следующий по номеру $(j + 1)$ -й датчик и алгоритм переходит к шагу 2.1.



2.3. Выявление максимальной температуры НК $T_{i}^{max} = \max T_{ij}; j = \overline{1, N}$ в массиве опрошенных датчиков на i -м шаге.

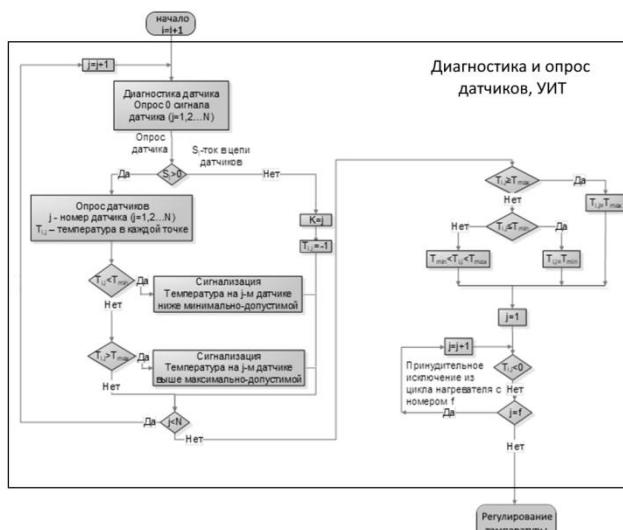


Рис. 3. Схема алгоритмического блока диагностики датчиков

3. Определение задающей температуры T_{spec_i} на i -м шаге.

3.1. Если $T_i^{max} > T_{max}$, то заданная регулятору ПИД температура на текущем шаге принимается равной максимальной из допустимых ограничениями (2) температуре $T_{spec_i} = T_{max}$;

3.2. Если $T_i^{max} < T_{min}$, то заданная регулятору ПИД температура на текущем шаге принимается равной минимальной из допустимых ограничениями (2) температуре $T_{spec_i} = T_{min}$;

3.3. Если $T_{min} < T_i^{max} < T_{max}$, то заданная регулятору ПИД температура на текущем шаге принимается равной требуемой проектной температуре НК T_{spec_i} .

4. Регулирование температуры

4.1. Если текущая температура в j -й контрольной точке находится внутри ограничений $T_{min} \leq T_{i,j} \leq T_{max}$, то мощность соответствующего УИТ на $i+1$ -ом шаге формируется по ПИД-закону в его конечно-разностной форме:

$$P_{i+1,j} = K_j(T_{spec_i} - T_{i,j}) + \frac{1}{A \cdot T_{i,j}} \text{Integrator}_{i,j}(T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) \quad (3)$$

$$+ A \cdot T_{i,j} \frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\tau_i - \tau_{i-1}}$$

$$\text{Integrator}_{i,j}(T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = \sum_{i=1}^n [(T_{spec_i} - T_{i,j})(\tau_i - \tau_{i-1})], \quad (4)$$

где τ_i – текущее время работы алгоритма, A – масштабный коэффициент, который устраняет негативное влияние на работу алгоритма большого шага дискретизации по времени (установка необходима, только если время опроса датчиков и определение управляющих воздействий превышает 5 секунд), значение коэффициента выбирается в зависимости от шага дискретизации по времени, $\text{Integrator}_{i,j}(T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1})$ – программа численного интегрирования.

4.2. Если текущая температура в j -й контрольной точке $T_{i,j} < T_{min}$, то мощность соответствующего УИТ на $i+1$ -ом шаге устанавливается равной $P_{i+1,j} = P_{max}$ согласно ограничений (1), а интегратор принудительно устанавливается в состояние

$$\text{Integrator}_{i+1,j}(T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = 0.$$

4.3. Если текущая температура в j -й контрольной точке $T_{i,j} > T_{max}$, то мощность соответствующего УИТ на $i+1$ -ом шаге устанавливается равным $P_{i+1,j} = 0$ согласно ограничений (1), а интегратор принудительно устанавливается в состояние

$$\text{Integrator}_{i+1,j}(T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = 0;$$

4.4. Мощности УИТ ограничены максимальным и минимальным значением (1), $s=j$ (см.рис.4).

5. Проверка на достижение предельного числа опрашиваемых датчиков

5.1. Если $j = N$, то осуществляется переход к 7-му шагу алгоритма.

5.2. Если $j < N$, то осуществляется переход к 6-му шагу алгоритма.

6. Переход к следующему УИТ $j = j + 1$. Переход к 4-му шагу.

7. Проверка на выход из алгоритма

7.1. Если $i < n$, то осуществляется переход к 1-му шагу работы алгоритма $i = i + 1$

7.2. Если $i = n$, то осуществляется выход из алгоритма.

Таким образом, как показывают многочисленные эксперименты [1, 4, 5] (см. например, рис. 4), непрерывный алгоритм САУ температурой НК ИИС МО позволяет плавно регулировать мощность УИТ, достаточно прост в реализации, уменьшает время и повышает точность регулирования по сравнению с простейшими требует достаточно малого вычислительного ресурса.

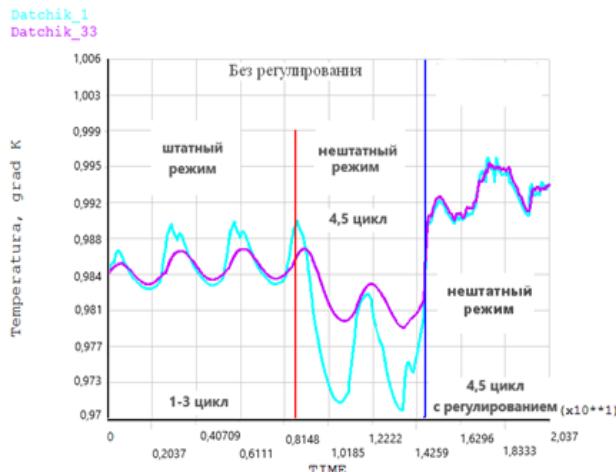


Рис. 4. Температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном АТСТ

IV. ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ НК

Непрерывный АТСТ носит универсальный характер, однако для своей работы требует значительных энергозатрат и довольно большого количества УИТ, как раз для обеспечения универсальности. Однако, если есть основания предполагать использование МО в достаточно ограниченном прогнозируемом режиме, чтобы однозначно определить соответствующее сечение НК, ответственное за ее термодеформацию, можно поставить задачу управления температурой для минимизации термодеформации НК только в этом сечении при минимальном использовании энергетического и массогабаритного бортового ресурса.

Для применения в подобных ситуациях разработан алгоритм оптимального управления тепловым режимом в наиболее подверженном тепловым воздействиям сечении НК МО.

Исследования в этом направлении проводились в работе [7], однако они были направлены на создание автоматической, а не оптимальной системы управления температурой на линии ответственного сечения НК. Для снижения энергетического и массогабаритного показателей САОТР МО рассмотрим актуальную задачу достижения максимально достижимой равномерности температурного распределения в ответственном за термодеформацию сечении НК с помощью ограниченного количества УИТ в САОТР.

В рассматриваемой конструкции МО узкопрофильного назначения (рис. 5) с противоположных сторон НК имеются прямоугольные области S1 и S2, на которые через открывющиеся люки МО действует температура внешней среды θ_{sr_gg} . На боковых поверхностях НК установлены тепловыделяющие приборы, периодически включаемые в работу, и УИТ №№ 1-6 ($N_a=6$), симметрично закрепленные по 3шт. на каждой из поверхностей S1 и S2 противоположных граней gg1 ($z = 0$) и gg2 ($z = R_3$) НК.

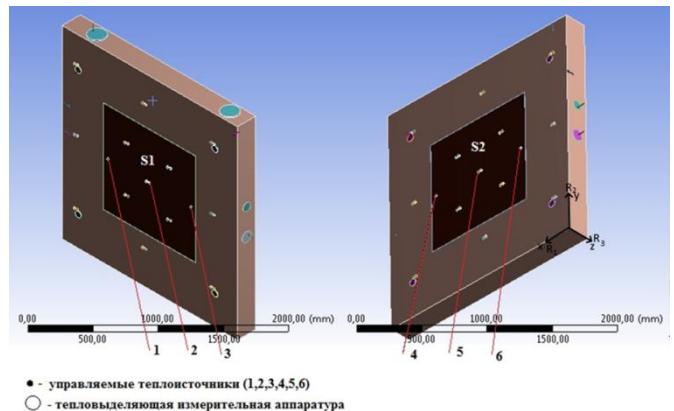


Рис. 5. Конструктивная схема НК МО узкопрофильного назначения

Распределение отклонения

$\theta(x, y, z, \tau) = T(x, y, z, \tau) - T_0$ температуры НК от ее базового постоянного значения T_0 (например, начального) в любой точке

$M(x, y, z) \in \overline{\Omega_M}$ области $\overline{\Omega_M}$ прямоугольной НК с размерами R_1, R_2, R_3 (рис. 6) описывается неоднородным дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} - a \left[\frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} = \omega(x, y, z, \tau) \right] \quad (5)$$

с однородными краевыми условиями [1, 8–10]

$$\left. \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (6)$$

$$\theta|_{\tau=0} = 0$$

В стандартизирующей функции $\omega(x, y, z, \tau)$, приводящей с помощью дельта-функции Дирака [8, 9] исходные неоднородные краевые условия к стандартной форме температурой в ответственном сечении, имеют вид:

$$\sum_{i=1}^N q_{ti}(\tau) V_{ti}(x, y^*) = \sum_{i=1}^3 q_{ti}(\tau) V_{ti}(x, y^*) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{tui}(\tau) V_{tui}(x, y^*) = \sum_{i=1}^3 q_{tui}(\tau) V_{tui}(x, y^*) \quad (8)$$

$$V_{ti}(x, y^*) = \delta_i(x - x_i)|_{y^*=0.5R_2}, i = 1, 2, 3; \quad (9)$$

$$V_{tui}(x, y^*) = \delta_i(x - x_i)|_{y^*=0.5R_2, z=R_3}, i = 4, 5, 6$$

Поставим задачу создания алгоритма управления температурой точек

$M^* \in M \in \overline{\Omega_M}$ линии ответственного сечения $L^*(x, y^*, z^*)$, $x \in [0, R_1]; y^* = 0.5R_2; z^* \in 0.5R_3$ с помощью только тех УИТ, которые размещены в непосредственной близости к этой линии. Значимые N_a УИТ расположены по 3 на противоположных гранях $z = 0$ и $z = R_3$ на линиях $y = 0.5R_2, z = 0$; $y = 0.5R_2, z = R_3$, (на рис. 6 – $q_{ti}(\tau), i = 1, 2, 3$ и $q_{tui}(\tau), i = 4, 5, 6$, а остальные $N - N_a$ УИТ предполагаются источниками возмущающих воз-

действий, как и другие тепловыделяющие элементы на НК. При этом линия $L^*(x)$ ответственного сечения проходит по середине НК $y^* = 0.5R_2, z^* \in [0.5R_3]$, а координаты x_i расположения значащих УИТ заданы соотношениями (9).

Требуется разработать алгоритм оптимального управления мощностью $q_{ti}(\tau), q_{tui}(\tau), i = \overline{1, N_a}$ УИТ, расположенных в области линии ответственного сечения $L^*(x, y^*, z^*)$ НК, имеющей форму прямоугольной призмы и обеспечивающего при заданном в (8,9) координатами $V_{ti}(x, y), V_{tui}(x, y)$ расположения УИТ наименьшее отклонение $\min |\theta(M^*, \tau)|_{\tau=\tau_k} = |\theta(M^*, \tau)|_{\tau=\tau_k} - \theta_{spec}(\tau_k)|$ температуры $\theta(M^*, \tau)|_{\tau=\tau_k}$ в точках $M^*(x, y^*, z^*) \in L^*(x, y^*, z^*)$ заданного сечения $L^*(x, y^*, z^*)$ НК от требуемого уровня θ_{spec} за минимально возможное время τ_k . В качестве критерия оптимальности в задаче максимальной точности ($\beta = 1$) применяется Чебышевская норма:

$$\begin{aligned} J &= \|\theta(x, y^*, z^*, \tau_k) - \theta_{spec}\|_{L_\infty[M^* \in L^*]} = \\ &= \max_{M \in L^*} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{spec}|, \\ \theta_{spec} &= const, \end{aligned} \quad (10)$$

которая отражает неравномерность температурного распределения в точках

$M^* \in L(x, y^*, z^*)$ линии ответственного сечения $L^*(x, y^*, z^*) = \{x: x \in [0, R_1], y^* = 0.5R_2, z^* = 0.5R_3\}$. Здесь τ_k – время завершения процесса регулирования температуры (компенсации возмущения).

Таким образом, можно сформулировать две задачи оптимального управления:

Определить оптимальное управление $U^{opt}(q_{ti}(\tau), q_{tui}(\tau))$ ограниченными по мощности в соответствии с (1) тепловыми потоками:

$$\begin{aligned} 0 \leq q_{ti}(\tau, x_i)|_{z=0, y=0.5R_2, x=x_i} &\leq q_{max} \\ 0 \leq q_{tui}(\tau, x_i)|_{z=R_3, y=0.5R_2, x=x_i} &\leq q_{max} \end{aligned} \quad (11)$$

в условиях ограниченной допустимой температуры

$$\begin{aligned} \theta(M, \tau) &\leq \theta_{max}, \tau \in (0, \infty), M \in \Omega_M, \theta_{max} \\ &= const, \end{aligned} \quad (12)$$

обеспечивающий при воздействии на объект (5), (6) неконтролируемых возмущений минимальное значение функционала (10)

$$J = J^{opt}(U_{opt}^{(\beta)}(\tau)) = \min_{U_{opt}^{(\beta)}(\tau) = U_{opt}^{(1)}(\tau)} J, \quad (13)$$

при заданном значении $\tau = \tau_k$ – задача максимальной точности ($\beta=1$) или $\min_{U_{opt}^{(\beta)}(\tau) = U_{opt}^{(1)}(\tau)} \tau_k(q_{ti}(\tau), q_{tui}(\tau))$ при заданном значении $J = J_{\text{доп}}$ – задача быстродействия ($\beta=2$).

В этой постановке задача максимальной точности ($\beta = 1$) принимает форму оптимальной минимаксной задачи

$$J^{opt} = \min_{q_{ti}^{(1)}, q_{tui}^{(1)}} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{spec}| \quad (14)$$

в модальном пространстве трансформант Фурье температуры $\theta(M^*, \tau)[2]$: при бесконечном количестве ограничений.

В случае задачи быстродействия ($\beta=2$)

$$J^{opt} = \min_{q_{ti}^{(1)}, q_{tui}^{(1)}} \tau_k \text{ выражение (10) трансформируется в бесконечное число ограничений вида:}$$

$$\begin{aligned} \max_{x \in M^*} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{spec}| &\leq \varepsilon_{\text{доп}}. \\ &= \tilde{\theta}(M^*, \tau)|_{\tau=\tau_k} \end{aligned} \quad (15)$$

При этом управление осуществляется одновременно всеми 6-ю УИТ

$$U^{(\beta)}(\tau) = (q_{t1}^{(\beta)}, q_{t2}^{(\beta)}, q_{t3}^{(\beta)}, q_{tu1}^{(\beta)}, q_{tu2}^{(\beta)}, q_{tu3}^{(\beta)})$$

с фиксированным их расположением в соответствии с (8,9)

Решение поставленной негладкой полубесконечной задачи оптимизации со свободным правым концом траектории в недифференцируемой области

$$\Omega_k: \{\theta(M^*, \tau): \theta(M^*, \tau_k) \in \max_{x \in [0, R_1]} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{spec}| \leq \varepsilon^\alpha,$$

$$\theta_{spec} = const, \alpha = const$$

классическими методами затруднительно[10, 11].

Для решения задачи воспользуемся альтернативным методом, предложенным в работе [11] и модифицированным для рассматриваемых приложений в работах [12, 13].

Мультиплективная форма допустимого управления (7) и (8) с фиксированными функциями $V_{ti}(x, y^*)$ и $V_{tui}(x, y^*)$ распределения значимых УИТ в соответствии с (9) позволяет в упрощенном случае синхронного управления интенсивностью всеми 6-ю симметрично расположенными УИТ $q_{ti}(\tau), q_{tui}(\tau), i = \overline{1, 6}$ отыскивать оптимальное в обеих задач управление:

$$\begin{aligned} U_{opt}^{(\beta)}(\tau), \beta = 1, 2; U_{opt}^{(1)}(\tau) &= \arg \min_{U^{(1)}(\tau)} J; \\ U_{opt}^{(2)}(\tau) &= \arg \min_{U^{(2)}(\tau)} \tau_k \end{aligned} \quad (16)$$

как в задаче максимальной точности ($\beta=1$) так и в задаче быстродействия ($\beta=2$) в параметрической форме с помощью метода моментов [10]. Тогда обе задачи сводятся к проблеме поиска конечного числа параметров $\Delta_\delta^{(\alpha)}$, $\delta=1, 2, \dots, I$; $\alpha=1, 2, \dots, J$; причем $\Delta_\delta^{(\alpha)}$ – продолжительность δ -го интервала постоянства значений интенсивности (мощности теплоисточников $q_{ti}(\tau) = q_{tui}(\tau) = q_{max}$) из общего их количества α , на которых каждая компонента вектора $\bar{U}^{(\beta)}(\tau)$ попеременно принимает свои предельно возможные значения на уровне ограничений (11) [10, 11] (рис. 6)

$$U_{opt}^{(\beta)}(\tau) = U_{opt}^{(\beta)}(\Delta_\delta^{(\alpha)}) = \begin{cases} q_{max}, \forall i = \overline{1, 6}, \delta = 1, 3, 5, \dots \\ 0, \forall i = \overline{1, 6}, \delta = 2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (17)$$

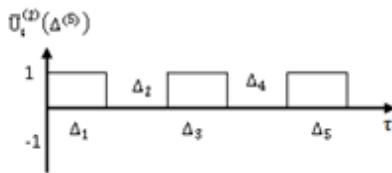


Рис. 6. Примерный вид компоненты $U_t^{(2)}(\Delta^{(5)})$, 5-и интервального оптимального управления ($\alpha=5$) в задаче быстродействия ($\beta=2$)

Продолжительность $\Delta_\delta^{(j)}, j = \overline{1, \alpha}$ и требуемое количество интервалов α , определяется альтернансым методом [11, 13] из системы трансцендентных уравнений:

$$\begin{aligned} \theta(x_3, \tau_k) \Big|_{x_3 \in [0, R_1], y=0.5R_2, z=0.5R_3} &= \pm \varepsilon^{(\alpha)}; \\ \frac{\partial \theta(x_3, \tau_k)}{\partial x} \Big|_{x_3 \in [0, R_1], y=0.5R_2, z=0.5R_3} &= 0, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\theta(x_3, \tau_k) = \theta(x, y, z, \tau)|_{x=x_3, y=0.5R_2, z=0.5R_3, \tau=\tau_k}$ – результирующее решение краевой задачи (5), (6) с параметризованным оптимальным управлением (17), $x_3 \in [0, R_1]$, $\varepsilon = 1, 2, \dots, \alpha$ – счетное множество предельных точек из замкнутого множества, $[0, R_1] \subset \bar{\Omega}_\rho \subset E^3$ области определения $M^* \in \bar{\Omega}_\rho \{x: y = 0.5R_2, z = 0.5R_3, x \in [0, R_1]\}$, функции $\theta(M^*, \varphi k)$, в которых выполняются соотношения (18);

$$\varepsilon^{(\alpha)} = \begin{cases} \varepsilon_{min}^\alpha = \min_{U_{opt}^{(1)} \Delta_\delta^{(\alpha)}} \max_{x \in [0, R_1]} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{spec}|; \\ \beta = 1; \delta = 1, 2, \dots, \alpha; x = x_3; \\ \varepsilon = 1, 2, \dots, (\alpha + 1); \alpha = 1, 2, \dots \\ \varepsilon_{don}^{(\alpha)}, \beta = 2, x = x_3, \varepsilon = 1, 2, \dots, \alpha \end{cases} \quad (19)$$

$\varepsilon_{min}^{(\alpha)} = \max_{x \in [0, R_1]} |\theta(\rho, \Delta^{(i)}, \varphi_k)|$ – предельно достижимое в ходе решения задачи максимальной точности ($\beta = 1$) в классе α -интервальных управлений отклонение $|\theta(M^*, \tau_k)|$ от заданной величины θ_{spec} ; $\varepsilon_{don}^{(\alpha)}$ – заданное максимально допустимое для решения задачи быстродействия ($\beta = 2$) отклонение $\theta(M^*, \tau_k)$ от требуемого θ_{spec} . При этом $\varepsilon_{don}^{(\alpha)}$ определяется как ближайший больший член ряда $\varepsilon_{min}^{(1)} > \varepsilon_{min}^{(2)} > \dots \geq \varepsilon_{min}^{(inf)}$, где каждый член $\varepsilon_{min}^{(\alpha)}$ – решение задачи максимальной точности ($\beta=1$) в α -параметрическом классе оптимальных управлений.

Процедура решения трансцендентной системы (18) выполняется специально разработанным пакетом прикладных программ [13] на основе численного решения краевой задачи теплопроводности (5), (6) в пакете «ANSYS». Результаты для одно- и двухинтервального управления $\alpha=1,2$ в рассматриваемом примере приведены на рис. 7–9. На рис. 7 приведено результирующее температурное распределение для оптимального по точности управления $\beta = 1$ для одно- и двухинтервального управления $\alpha=1,2$ и отклонение от заданной температуры в линии ответственного сечения НК $L^*(M^*)$, $y = 0.5R_2, z = 0.5R_3$. Максимальное на этой линии отклонение температуры для двухинтервального управления $\alpha=2$

не превышает 4°C при воздействии наиболее тяжелого варианта тепловой нагрузки, что допустимо для рассматриваемого в этом примере варианта функционального назначения мобильного объекта.

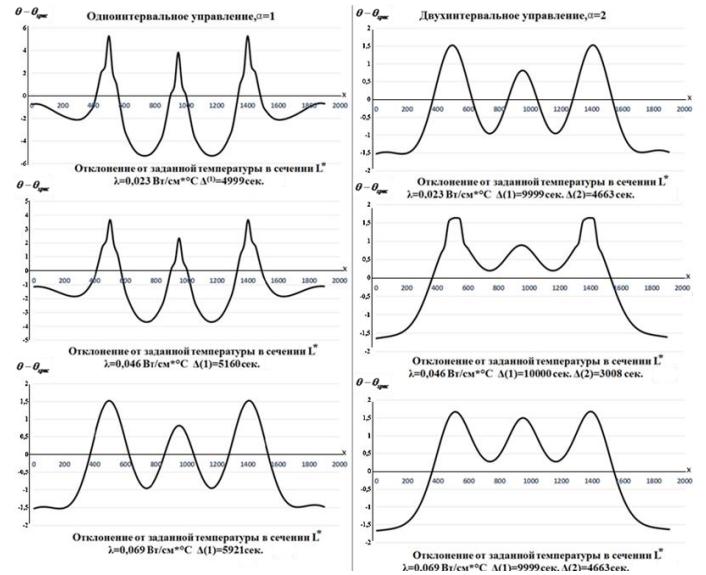


Рис. 7. Отклонение $\varepsilon(\alpha)_{min}$ от заданной температуры на линии сечения при оптимальном по точности управлении ($\beta = 1$)

Зависимость результатов решения оптимальных задач от свойств материала конструкции-коэффициента теплопроводности λ представлена на рис. 8 и 9.

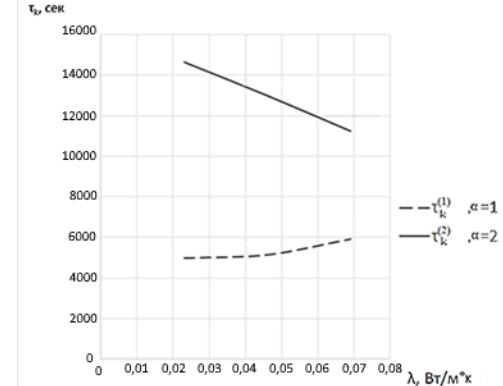


Рис. 8. Зависимость времени управления τ_k от коэффициента теплопроводности для одно- и двухинтервального ($\alpha=1, \alpha=2$) управления

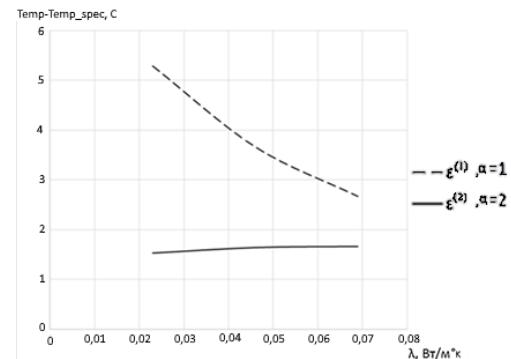


Рис. 9. Зависимость достижимой погрешности $\varepsilon_{min}^{(\alpha)}$ управления от коэффициента теплопроводности и количества интервалов ($\alpha=1, \alpha=2$)

Полученные результаты позволяют констатировать, что двухинтервальное ($\alpha=2$) управление в обеих задачах обладает существенно меньшей чувствительностью к коэффициенту теплопроводности λ при существенно более высокой точности приближения к заданной температуре. Это обеспечивает конструктору большую свободу при выборе материала конструкции. Предложенный алгоритм верифицирован на конечно-элементной функционально ориентированной модели в программной среде «ANSYS». Полученные результаты, моделирующие реализацию алгоритма бортовыми компьютерами мобильных объектов различного назначения, демонстрируют возможность снижения термодеформационной составляющей измерительной погрешности с минимальным количеством УИТ.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан эффективный непрерывный алгоритм термоградиентной стабилизации температуры НК ИИС МО для супервизорного автоматического управления температурой в подсистеме САОТР МО, отклонение температуры от заданной при автоматическом управлении с использованием непрерывного алгоритма не превышает 4°C .

Обоснована и поставлена задача оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении НК. Решена задача синхронно оптимального управления температурой НК группой дискретно распределенных управляемых теплоисточников. Получены зависимости оптимального температурного распределения от теплофизических характеристик материала НК. Отклонение температуры на линии ответственного сечения от заданной при оптимальном управлении УИТ не превышает $1,6^{\circ}\text{C}$ при двухинтервальном и $5,2^{\circ}\text{C}$ при одноинтервальном управлении.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного здания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

ЛИТЕРАТУРА

1. Livshits M.Yu., Borodulin B.B. Optimal control of temperature modes of the instrumental constructions of autonomous objects. EPJ Web of Conferences // Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015. – 2016. – Vol. 110. – N. 01036. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201611001036>.
2. Tsaplin S.V., Belokonov I.V., Bolychev S.A. etc. Investigation of the operating conditions influence on the optical telescope performance when capturing star images // Computer Optics. – 2022. – Vol. 46, Issue 5. № 5. – P. 713-723.
3. Викулов А.Г. Математическое моделирование теплообмена в космических аппаратах // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2017. – № 2. – С. 61-78.
4. Livshits M.Yu., Borodulin, B.B., Nenashev A.V., Savelyeva Yu.O. Автоматическая компенсация термодеформаций несущих конструкций киберфизических информационно-измерительных систем // Математические методы в технологиях и технике - ММТТ. – 2021. – № 3. – С. 51-54.
5. Лившиц М.Ю., Деревянов М.Ю., Давыдов А.Н., Копытин С.А. Стабилизация температурного поля несущих конструкций автономных объектов // Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». – 2013. – Ч. 2. – С. 47-51.
6. Кульба В.В., Павлов Б.В., Микрин Е.А., Платонов В.Н. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / под общ. ред. д.т.н. Е. А. Микрина. – М.: Наука, 2006. – 578 с.
7. Савельева Ю.О., Лившиц М.Ю., Адеянов И.Е., Данилукин И.А. Термоградиентная размерная стабилизация ответственных сечений несущей конструкции автономного объекта // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ, 2020. – Т. 2. – С. 79-87.
8. Panoporm Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2003. – 299 с.
9. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
10. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1965. – 476 с.
11. Panoporm Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 335 с.
12. Borodulin B., Livshits M. Optimal control of temperature modes of the instrumental constructions of autonomous objects // In: EPJ Web of Conferences. Vol. 110. Thermophysical Basis of Energy Technologies. – 2016.
13. Livshits M.Yu., Borodulin B.B., Korshikov S.E. Optimization of Temperature Distributions in Critical Cross-sections of Load-bearing Structures of Measurement Optical Systems of Autonomous Objects // MATEC Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies (TBET-2016). – 2017. – Vol. 92, N. 01053. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20179201053>.

Преобразование структуры нелинейной распределенной системы для применения обобщенных критериев устойчивости

Мясникова Елена Васильевна
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский федеральный
университет
Пятигорск, Россия
alena.pink.hummer@gmail.com

Чернышев Александр Борисович
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский федеральный
университет
Пятигорск, Россия
chalbor@rambler.ru

Майрансаев Зураб Русланович
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский
горно-металлургический институт»
Владикавказ, Россия
sarmat007@inbox.ru

Аннотация. В работе рассмотрены проблемы исследования устойчивости нелинейных систем с распределенными параметрами. Проведен анализ известных обобщенных критериев анализа устойчивости таких систем. Разработка частотных методов проектирования распределенных регуляторов для нелинейных распределенных объектов, в настоящее время, находится в начальной стадии. В данной работе показана возможность применения обобщенных критериев при использовании методики выделения нелинейной составляющей в виде отдельного звена.

Annotation. The paper discusses the problems of studying the stability of nonlinear systems with distributed parameters. An analysis of the known generalized criteria for analyzing the stability of such systems is carried out. The development of frequency methods for the design of distributed controllers for nonlinear distributed objects is currently at the initial stage. This paper shows the possibility of applying generalized criteria when using the technique of identifying a nonlinear component in the form of a separate link.

Ключевые слова: Распределенные системы, нелинейный элемент, устойчивость, аппроксимация.

Key words: Distributed systems, nonlinear element, stability, approximation.

I. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании любой системы управления, одним из важнейших этапов является исследование положения равновесия системы, а также анализ ее устойчивости. Для линейных сосредоточенных систем этой проблемы практически не существует, разработаны и реализованы на практике известные критерии устойчивости, такие как критерий Найквиста, Михайлова и др. Для анализа нелинейных сосредоточенных систем известны критерии В-М. Попова, круговой критерий. Значительно сложнее обстоит дело с анализом устойчивости систем с распределенными параметрами. Это системы модели которых описываются чаще всего уравнениями в частных производных, поведение которых зависит не только от времени, но и от пространственных координат объекта управления. Применительно к линейным распределенным системам в работах [1, 2] приведен анализ устойчивости по дисперсионным со-

отношениям, а также критерий устойчивости Найквиста для пространственно-инвариантных систем со скалярным входным воздействием.

II. АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Проектирование нелинейных систем управления вообще, и систем с распределенными параметрами в особенности представляет собой значительные сложности. Это связано с огромным разнообразием нелинейностей. Создать некую общую методику анализа устойчивости для всего спектра нелинейных распределенных систем скорее всего не представляется возможным в принципе. Однако, среди множества таких систем удается определить и выделить некоторые классы, для которых удается обобщить некоторые известные критерии устойчивости, естественно, с учетом определенных ограничений. В работах [3–6] приводятся обобщенные критерии анализа устойчивости для класса нелинейных распределенных систем, такие как: обобщенный критерий анализа абсолютной устойчивости В-М. Попова, цилиндрический и круговой критерии. Однако применение этих критериев возможно для достаточно широкого, но все же ограниченного класса нелинейных распределенных систем. Указанные критерии применимы для систем, структурная схема которых может быть представлена в виде последовательного соединения нелинейного элемента и основной линейной части объекта. В этом случае существует возможность использовать хорошо известный аппарат передаточных функций, с помощью которых описывается линейная часть нелинейной системы.

Разработка методов синтеза распределенных систем управления имеет важное не только научное, но и практическое значение, поскольку множество технологических процессов изменяются не только во времени, но и в пространстве [7–10]. Для выделенного класса распределенных объектов (решение которых распадается по собственным вектор-функциям оператора объекта) разработана частотная концепция анализа и синтеза систем с распределенными параметрами. Рассмотрим методы проектирования распределенных систем управления для объектов, принадлежащих выделенному классу, параметры которых описываются нелинейными функциями фазовых переменных объекта управления.

Рассмотрим, например, тепловые процессы, описываемые основным уравнением математической физики – уравнением теплопроводности:

$$\Delta u - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{f}{\lambda}, \quad a = \sqrt{\frac{\lambda}{c\gamma}},$$

где u – температура тела, γ – плотность, λ – коэффициент теплопроводности, t – время, Δ – дифференциальный оператор Лапласа, f – интенсивность источников тепла, a – коэффициент температуропроводности материала.

Данное уравнение описывает линейный процесс распространения тепла в одномерном объекте. При этом коэффициент температуропроводности считается постоянным для конкретного материала. Однако в общем случае коэффициент температуропроводности может быть нелинейным, т.к. параметры, от которых он зависит, могут изменяться в процессе функционирования системы. Кроме этого, функция выражающая интенсивность источников тепла также может быть нелинейной. Нелинейными могут быть также функции, входящие в условия краевой задачи математической модели системы

III. ПРИМЕР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В качестве примера рассмотрим математическую модель процесса распространения тепла в пластине конечных размеров.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right);$$

$$0 < x < L_x; \quad 0 < y < L_y; \quad 0 < z < L_z.$$

Границные и начальные условия:

$$T(x, y, L_z, \tau) = U(x, y, \tau); \quad \frac{\partial T(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0;$$

$$T(x, 0, z, \tau) = T(x, L_y, z, \tau) = T(0, y, z, \tau) = T(L_x, y, z, \tau) = 0;$$

$$T(x, y, z, 0) = 0.$$

где $T(x, y, z, \tau)$ – температурное поле пластины; L_x, L_y, L_z – заданные числа; τ – время; a – коэффициент температуропроводности материала пластины; $U(x, y, z)$ – управляющее воздействие; $T(x, y, z^*, \tau)$ – функция выхода (z^* – заданное значение $(0 < z^* < L_z)$).

Геометрические размеры камеры заданы в виде: $L_x=1,5\text{м.}$; $L_y=1\text{м.}$; $L_z=0,5\text{м.}$. Датчики измерения температуры располагаются на плоскости $\{x, y, z^*=0,35\text{м.}\}$.

Структурная схема такой системы не может быть представлена в виде последовательного соединения нелинейной и линейной части, так как нелинейный параметр находится внутри самой системы, представленной передаточной функцией. При этом нелинейный параметр невозможно выделить аналитически в виде отдельного множителя.

IV. АППРОКСИМАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

В литературе [9, 10] описана методика аппроксимации распределенных систем. Используя реакцию объекта по двум пространственным модам (статическим и динамическим) можно определить параметры аппроксимации

онного (линейного) звена, описывающего рассматриваемый объект. Разработана методика разделения линейной и нелинейной частей передаточной функции нелинейного распределенного объекта. Применяя данную методику для показанной выше математической модели линейная часть представляется в виде:

$$W_L(G, s) = \frac{K_1}{\beta_1(G, s)} \cdot \exp(-\beta_1(G, s) \cdot 0.25);$$

$$\beta_1(G, s) = \left(\frac{s}{a_1} + G \right)^{\frac{1}{2}}, \quad G_{1,1} \leq G \leq \infty;$$

Нелинейная часть может быть представлена в виде:

$$W_{N,i}(G, s, T) = \left(\frac{K_{N,i}(T)}{\beta_{N,i}(G, s, T)} \right) / \frac{K_1}{\beta_1(G, s)} \cdot \exp((-\beta_{N,i}(G, s, T) + \beta_1(G, s)) \cdot 0.25);$$

$$\beta_{N,i}(G, s, T) = \left(\frac{s}{a_{N,i}(T)} + G \right)^{\frac{1}{2}}, \quad i = 2, 3, 4, \quad G_{1,1} \leq G \leq \infty.$$

Параметры нелинейного объекта приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА

i	1	2	3	4
T	200	400	600	800
K _i	41.397	32.617285	26.928	22.91841
ΔD _i	0.2497	0.249641	0.249824	0.24979
a _i	0.0000881	0.0001475	0.000207	0.000229

Используя параметры, приведенные в табл. 1, была разработана программа расчетов статического коэффициента нелинейного блока, параметры которого приведены выше. По результатам расчетов построен график, приведенный на рис. 1.

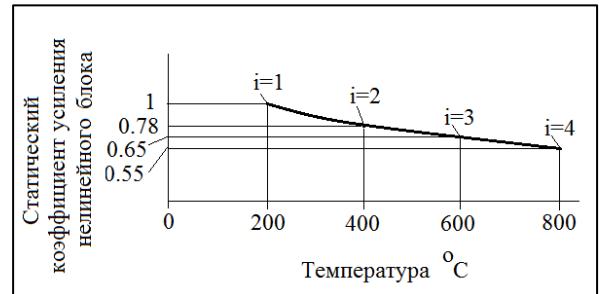


Рис. 1. Изменение статического коэффициента усиления нелинейного блока

V. ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ПОПОВА

Результаты исследований показывают возможность применения обобщенных критериев устойчивости для нелинейных распределенных систем. Таким образом, график нелинейной характеристики попадает в сектор первой четверти. Угловой коэффициент, ограничивающий сектор определяет точку на действительной оси комплексной плоскости через которую проходит прямая Попова. Линейную часть системы характеризует годограф. Подбирай общий коэффициент усиления K_1 в выражении, описывающем линейную часть системы, можно определить предельное расположение годографа и прямой Попова, при которых система сохраняет устойчивость (рис. 2). На рис. 3 показано взаимное расположение для второй пространственной моды.

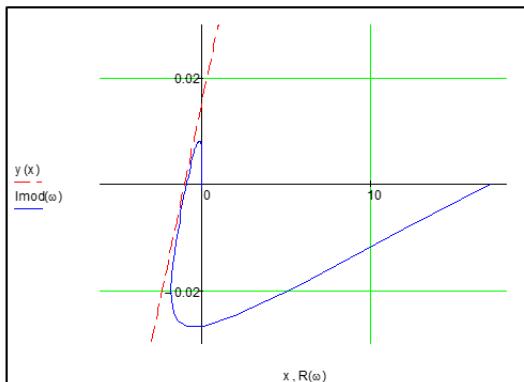


Рис. 2. Взаимное расположение годографа и прямой Попова для первой пространственной моды

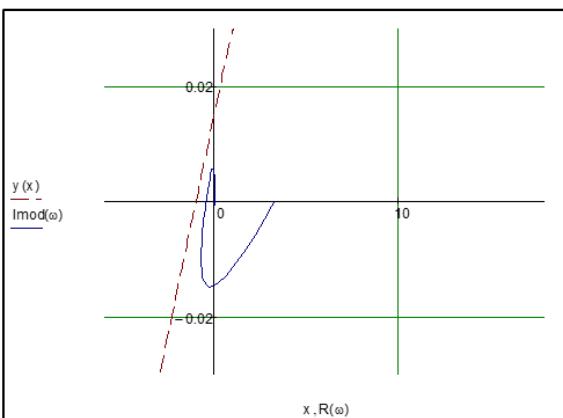


Рис. 3. Взаимное расположение годографа и прямой Попова для второй пространственной моды

Результат компьютерного моделирования процесса (рис. 4) показывает, что достигается требуемое значение температуры при устойчивости системы).

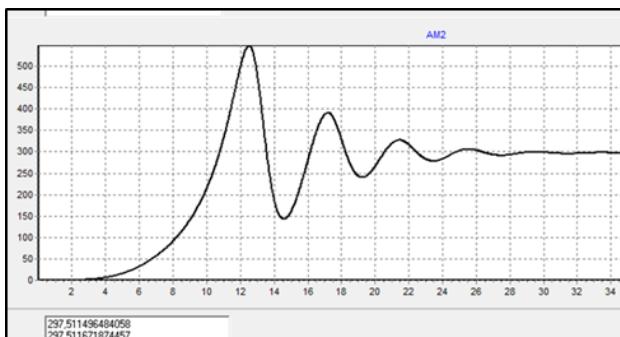


Рис. 4. График переходного процесса

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известные обобщенные критерии анализа устойчивости нелинейных распределенных систем подразумевают, что структурная схема системы может быть представлена в виде последовательного соединения нелинейного элемента и линейной части объекта. Но значительное количество нелинейных распределенных систем содержат нелинейный элемент внутри самого объекта. Результаты исследования показывают возможность применения обобщенных критериев устойчивости для нелинейных распределенных систем данного класса.

ЛИТЕРАТУРА

- Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: Изд-во РИА-КМВ, 2002. – 212 с.
- Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.
- Чернышев А.Б. Обобщение методов анализа устойчивости для распределенных систем // Современная наука и инновации. – 2015. – № 3 (11). – С. 16-22.
- Чернышев А.Б. Модифицированный годограф пространственно-aperiodического звена // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 2-1. – С. 159-163.
- Чернышев А.Б. Модифицированный критерий абсолютной устойчивости нелинейных распределенных систем управления // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (151). – С. 38-41.
- Чернышев А.Б. Управление температурными полями объектов с распределенными параметрами // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 24-27.
- Першин И.М., Носова В.А., Цаплева В.В. Самонастраивающиеся распределенные системы управления // Современная наука и инновации. Научный журнал. – 2023. – Вып. № 1 (41). – С. 16-29.
- Першин И.М., Шестopalов М.Ю. Проектирование распределенных систем. Теория и практика. – 2-е изд. переработанное и дополненное монография. – Изд-во СКФУ, 2023. – 252 с.
- Першин И.М., Носова В.А., Малков А.В. Проектирование распределенных систем управления с использованием результатов экспериментальных исследований // XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУБ 2021. – С. 218-223. – DOI: 10.18522/syssyn-2022-42.
- Першин И.М., Носова В.А., Цаплева В.В. Методика проектирования распределенных самонастраивающихся систем управления // V Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2023): Сборник докладов. Санкт-Петербург. 26–28 сентября 2023 г. – СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 298 с. – ISBN 978-5-7629-3236-3.

Системный анализ процессов в гидролитосфере Ессентукского месторождения минеральных подземных вод

Бондин Иван Андреевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
bondinivan@yandex.ru

Снурницин Григорий Константинович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
grigoriysnurnicin@gmail.com

Аннотация. При разработке в последние годы новых участков Ессентукского месторождения минеральных подземных вод осуществляют добычу гидроминерального сырья с более глубоких водоносных горизонтов, при этом выявились, что процессы, которые не встречались в менее глубоких водоносных горизонтах: минерализация добываемого сырья существенно зависит от дебитов скважин; при добычи наблюдается существенные выбросы газо-водяной смеси. Это требует разработки новых методик проектирования систем управления, учетом действующих факторов.

Annotation: The report discusses the methodology for building a one-dimensional distributed information transmission and processing system using the methodology for studying systems with distributed parameters. The study of processes in a one-dimensional information processing system is shown. Examples of building an information processing system in the absence of disturbing influences and with large disturbing influences imposed on transmitted useful signals are considered. The results of numerical experiments are presented.

Ключевые слова: Ессентуки, месторождение минеральных подземных вод, гидроминеральное сырье, КМВ, скважина, опытно-фильтрационные работы.

Keywords: Essentuki, mineral groundwater deposit, hydromineral raw materials, CMS, well, pilot filtration works.

I. ВВЕДЕНИЕ

Курортный регион Кавказские минеральные воды известен своим лечебным гидроминеральным сырьем – минеральные подземные воды, углекислый газ, грязь о. Тамбукан. Роль гидроминеральной базы региона КМВ играет важное значение в развитии экономических и других состояний рассматриваемого региона. Как показывают исследования в настоящее время ведется освоение достаточно глубоко залегающих месторождения минеральных вод. (Так на пример на Новоблагодарненском участке Ессентукского месторождения недропользователем пробурены новые скважины глубиной залегания от 506-770 м). В связи с тем, что осваиваются более глубинные месторождения МПВ наблюдаются факторы которые раньше не учитывались при добычи гидроминерального сырья: Зависимость состава минеральной

воды (минерализации) от величины дебита добывающей скважины (минерализация является переменной величиной дебита). Наблюдаются периодические выделения углекислого газа в больших объемах в добывающей скважине (попутный газ из жидкой фазы в момент добычи (в добывающем скважине) переходит в газообразное состояние, образуя спонтанный выброс большого количества газа, в добывающем гидроминеральном сырье. Без условно при проектировании систем управления дебитами добывающих скважин необходимо учесть рассматриваемые выше факторы. В отечественной и зарубежной литературе исследования рассматриваемых факторов не обнаружено, следовательно, необходимо: разработать математические модели описывающие рассматриваемые факторы. Разработать математические модели гидролитосферных процессов с учетом, приведенных выше факторов. Разработать методики синтеза регуляторов дебитами добывающих скважин с учетом, перечисленных выше факторов. Исследовать поведение замкнутых систем, точность регулирования и максимальные забросы (перерегулирование).

Территория объекта исследования, в пределах которой находится расположено Ессентукское месторождение минеральных подземных вод, с 1992 г. имеет статус особо охраняемого эколого-курортного региона Российской Федерации – Кавказские Минеральные Воды (ООЭКР КМВ). Регион КМВ охватывает часть Ставропольского края, Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республик и объединяет ряд курортов федерального значения, организованных преимущественно на базе месторождений и источников минеральных подземных вод, пригодных для лечебных целей.

Площадь региона КМВ порядка 5,3 тыс. км², наибольшая протяженность с севера на юг достигает 90 км, с юго-запада на северо-восток 105 км, население около 1 млн. человек, физико-географическое местоположение – северный склон Главного Кавказского хребта, центральная часть Северного Кавказа, Минераловодская равнина [1].

Ессентукское месторождение минеральных вод расположено в северо-восточном секторе региона КМВ (рис. 1).

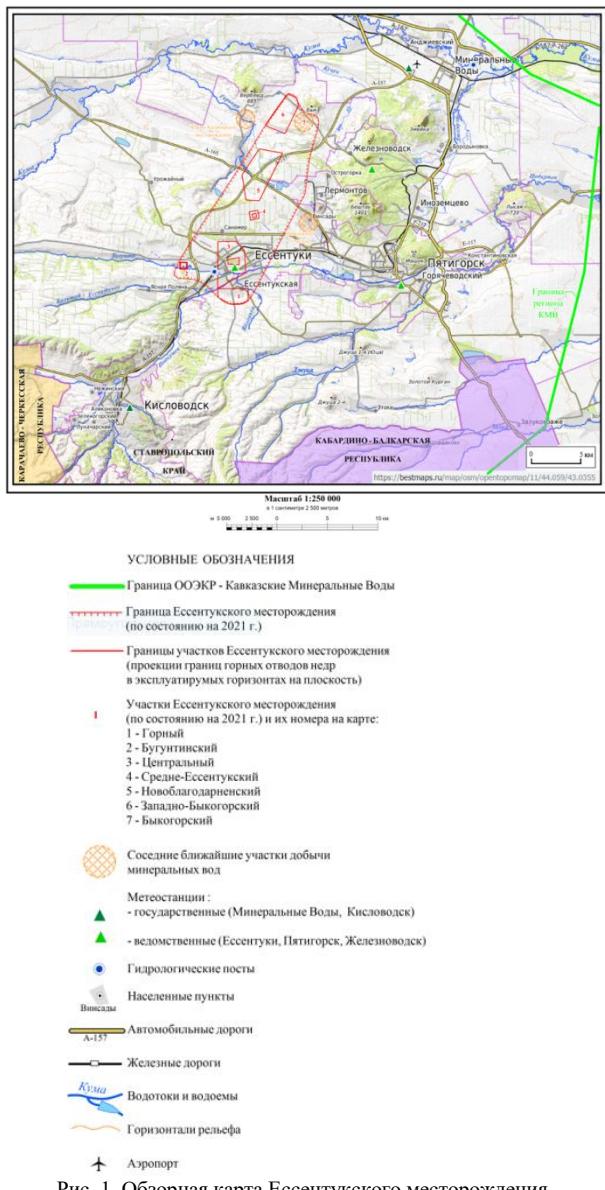


Рис. 1. Обзорная карта Ессентукского месторождения

Наибольшим разнообразием газогидрохимических типов подземных вод характеризуются участки недр в районе гор-интрузивов (застывшие горные образования состоящие из застывшей магмы, не прорвавшей земную поверхность), где подземные воды формируются в результате субвертикальных восходящих и нисходящих перетоков и смешения по системам трещин и разломов флюидов различного генезиса.

На участках некоторых гор-интрузивов (Машук, Бештау, Железная, Развалка) установлены отрицательные геотемпературные аномалии, а зоны кольцевых и радиальных разломов вблизи гор характеризуются повышенными температурами.

За счет инфильтрации пресных атмосферных осадков в зоне активного водообмена формируются молодые (в геологическом масштабе) подземные воды, содержа-

щие растворенный кислород и азот. С погружением на северо-восток, вне зон повышенной тектонической трещиноватости, азотные воды сменяются метаново-азотными, сероводородными. В зонах повышенной трещиноватости в подземных водах преобладает углекислый газ.

Указанные выше 4 эксплуатационных водоносных горизонтов Ессентукского месторождения минеральных подземных вод вмещают разнообразные по составу и физико-химическим свойствам типы минеральных вод:

- 1) по газовой компоненте: слабоуглекислые, углекислые, сероводородные (слабосульфидные в терминах бальнеозаключений);
- 2) по минерализации: пресные, мало-, средне-, высокоминерализованные;
- 3) по анионному составу: преимущественно хлоридно-гидрокарбонатные;
- 4) по катионному составу: преимущественно натриевые;
- 5) по температуре (согласно ОСТ 41-05-263-86): холодные, теплые, очень теплые, горячие.
- 6) по содержанию бальнеокомпонентов: борные, кремнистые, железистые, углекислые, сероводородные (слабосульфидные в терминах бальнеозаключений).

Такой разнообразный состав и широкий спектр физико-химических свойств подземных вод позволяет использовать их как питьевые столовые, лечебно-столовые, лечебные воды, а также как бальнеологические воды для наружного применения.

Наиболее ценными подземными водами являются углекислые воды хлоридно-гидрокарбонатного натриевого состава двух гидрохимических типов «Ессентукский № 4» и «Ессентукский № 17» (по классификации ГОСТ Р 54316-2020), развитые в дат-зеландском и сеноман-маастрихтском водоносных горизонтах.

Началом исследований Ессентукского месторождения, состоящего к настоящему времени из 7 эксплуатационных участков, является опубликованное описание источников солоноватой воды в долине ручья Кислушки, на территории Лечебного парка, сделанное известным частным московским врачом Ф. П. Гаазом (позднее хирургом в русской армии и членом Московского тюремного комитета) в 1811 г. и немного позднее, в 1823-1825 гг., профессором Петербургской медико-хирургической академии А. П. Нелюбиным [2]. В 200-летней истории изучения этого участка остается открытым вопрос по формировании гидрохимического состава подземных минеральных вод, слабая изученность углекислый газа при формировании подземных вод. На месторождении остро стоит вопрос управления дебитами скважин при заданном уровне и существенном влиянии газового фактора.

Для того, чтобы разобраться с назревшими вопросами необходимо разобраться в природе образования углекислого газа в недрах гидролитосферы.

Условия образования природных газов исключительно разнообразны. Это химические реакции, воздействие на горную породу высоких температур и давлений, радиоактивный распад, биохимическое превращение органического вещества и т.д. Зачастую отдельные газовые компоненты образуются в различных термодинамических условиях (метан, диоксид углерода, сероводород, азот и др.), и отличить их можно лишь с использованием изотопных методов.

Диоксид углерода играет первостепенную роль в круговороте веществ на нашей планете и входит в значительных количествах в состав атмосферы, гидросфера и литосфера, что подтверждает широко известное положение В.И. Вернадского о том, что вся область планеты, в которой находится вода лежит в пространстве, пронизанной углекислотой. Максимальное количество углекислоты, которое может быть поглощено седиментационной водой из воздуха, составляет 0,814 см³/л. Вследствие химической активности диоксида углерода эти незначительные концентрации быстро вступают в реакцию и выводятся из раствора.

Генетически углекислота исключительно разнообразна и выделить чистые генетические разности не всегда удается даже с использованием изотопных методов. По преобладающему генетическому содержанию CO₂ следует выделить три главных источника: а) органогенный, б) ювенильный и в) термометаморфический [2].

Мощным и распространённым источником углекислоты в осадочных отложениях является органическое вещество. По данным В.А. Успенского в почвах и поверхностных отложениях в год образуется до 13,5 · 10¹⁷ тн CO₂. В донных осадках CO₂ как конечный продукт разложения ОВ не может образовать сколь-нибудь крупные скопления – или поступает в атмосферу, или растворяется в водах, или связывается в карбонаты.

По данным А.В. Сидоренко с соавторами только за счёт метаморфизма докембрийских осадочных пород могло образоваться примерно 1,4 · 10¹⁷ тонн углекислого газа.

Но процессы метаморфизма карбонатных пород охватывают и отложения фанерозоя. Высокую концентрацию CO₂, мы фиксируем в подземных водах и залежах (Кавказ, Западная Сибирь, Волго-Урал и др.).

Бессспорно, главным источником углекислоты является ювенильная глубинная углекислота, которая пронизывает литосферу, поступая по глубинным разломам и жерлам вулканов. Среди газов вулканов и фумаролл содержание CO₂ иногда составляет более 80%.

Углекислые воды широко распространены в осадочных породах. Так, в районе КМВ, по данным В.Н. Корценштейна растворённые газы пластовых вод мезозойских отложений почти на 100% состоят из углекислоты при газонасыщенности до 16000-23000 см³/л. К западу от КМВ в Черкесском районе установлено обильное насыщение углекислой подземных вод юрских отложений: содержание углекислого газа нередко достигает 50% при газонасыщенности 1100-2000 см³/л.

Для выяснения генезиса углекислоты подземных вод, залежей нефти и газа широко используется изотопный метод (Галимов Э.М., Панкина Р.Г., Алексеев Ф.А. и др.). В связи с большой полигенностью углекислоты и возможностью изотопного обмена между углеродом различных карбонатных соединений заключение о генезисе углекислоты по изотопному составу следует делать с учётом всей геолого-геохимической информации и изотопного состава возможных источников её образования.

В 50-е годы XX века велась масштабная разведка на воды типов Ессентуки 17 и 4, глубины залегания данных углекислых вод на Новоблагодарненском участке Ессентукского месторождения составляют порядка 500-865 м. Скважины были пробурены как разведочные малого диаметра, рассчитанные на небольшие дебиты. В настоящее время имеются экономические стимулы и технические возможности обустроить скважины большего диаметра, улучшенной конструкции для обеспечения больших дебитов (востребованным развитием бальнеологических здравниц региона КМВ, и потребностью потребителей бутилированной минеральной воды как в РФ, так и других стран).

Результаты: бурение новых скважин позволяет создать качественную наблюдательную сеть участка недр на котором производится добыча гидроминерального сырья с глубоких горизонтов, а также изучить специфику залегания углекислых вод при строительстве скважин.

При анализе ретроспективных данных по разведочно-эксплуатационной скважине № 46 Новоблагодарненского участка получены данные, приведенные в таблице №1.

ТАБЛИЦА 1 ПРЕДЕЛЫ КОЛЕБАНИЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ, РАСТВОРЕННОЙ УГЛЕКИСЛОТЫ И ОРТОБОРНОЙ КИСЛОТЫ В ВОДАХ СКВАЖИНЫ № 46 НОВОБЛАГОДАРНЕНСКОГО УЧАСТКА ЕССЕНТУКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗА МНОГОЛЕТНИЙ ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

Период	Отбор (мин-макс (сред.), м ³ /сут)	Минерализация (мин-макс (сред.), г/дм ³)	CO ₂ _{раств} (мин-макс (сред.), г/дм ³)	H ₂ BO ₃ мин- макс (сред.), г/дм ³
Кондиции	-	10,0-14,0	0,5-2,35	0,5-2,35
1953-1954	0-40 (89)	12,49-13,55 (13,28)	1,13-1,13 (1,13)	-
1955-1956	0-531 (122)	12,51-13,74 (13,48)	0,72-2,50 (1,35)	-
1978-1979	0-40 (37)	-	1,34-1,96 (1,62)	-
1981-1982	0-60 (34)	-	-	-
1983-1984	0-62 (29)	-	-	-
1985-1986	0-90 (35)	-	-	-
1987-1988	0-104 (43)	11,00-11,69 (11,27)	1,34-1,96 (1,62)	-
1989-1990	0-112 (51)	10,78-11,86 (11,05)	0,49-1,48 (1,15)	-
1991-1992	0-77 (25)	10,88-11,65 (11,12)	0,66-1,36 (0,98)	-
1993-1994	0-77 (9)	10,84-11,28 (11,02)	0,77-2,14 (1,44)	0,038
1995-1996	7-28 (16)	10,24-11,22 (10,76)	0,78-1,80 (1,34)	0,035
1999-2000	-	10,82-11,00 (10,89)	0,91-0,97 (0,95)	-
2001-2002	-	10,62-12,32 (11,00)	0,57-1,31 (0,99)	-
2003-2004	-	10,45-11,06 (10,65)	0,00-2,36 (1,38)	-
2005-2006	-	10,33-11,53 (10,76)	0,40-2,13 (1,29)	-
2007-2008	1-71 (51)	10,41-10,93 (10,59)	0,38-2,21 (1,04)	0,034- 0,041 (0,038)

XII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»

Период	Отбор (мин-макс (сред.), м ³ /сут)	Минерализация (мин-макс (сред.), г/дм ³)	CO ₂ раств (мин-макс (сред.), г/дм ³)	H ₂ BO ₃ мин- макс (сред.), г/дм ³
2009-2010	20-82 (74)	10,41-10,78 (10,53)	0,64-2,42 (1,04)	0,000- 0,067 (0,044)
2011	20-81 (69)	10,47-10,58 (10,53)	0,67-2,22 (1,56)	0,041- 0,083 (0,067)
2012	20-92 (75)	10,22-10,47 (10,33)	0,44-1,88 (1,00)	0,035- 0,065 (0,060)
2013	40-79 (72)	9,90-10,47 (10,30)	0,21-1,36 (0,70)	0,044- 0,060 (0,056)
2014	20-79 (73)	9,90-10,45 (10,27)	0,09-1,97 (1,14)	0,039- 0,059 (0,050)
2015	20-79 (73)	9,97-10,39 (10,09)	0,70-1,49 (0,94)	0,046- 0,055 (0,050)
2016	20-79 (62)	9,90-10,17 (10,04)	0,40-1,04 (0,69)	0,047- 0,062 (0,052)
2017	20-69 (63)	9,75-10,06 (9,87)	0,41-1,13 (0,69)	0,048- 0,050 (0,049)
2018	20-66 (64)	9,57-10,61 (9,77)	0,32-0,99 (0,55)	0,036- 0,060 (0,050)
2019	20-129 (64)	9,63-10,30 (9,77)	0,48-1,14 (0,77)	0,042- 0,067 (0,051)
2020	20-70 (63)	9,43-10,39 (9,70)	0,42-1,52 (0,83)	0,028- 0,080 (0,056)

Примечание: нет данных

Режим основных макрокомпонентов и минерализации в течение длительного периода с 1953 по декабрь 2020 года показывает, что эти показатели сильно изменяются. Минерализация вод скважины планомерно снижается от среднего значения 13,38 г/дм³ в 1953-1954 гг. до 9,70 г/дм³ в 2020 году, т.е. ее значение упало более чем на 3,5 г/дм³ (26%). Содержание CO₂раств за рассматриваемый период также отчетливо снижалось, хотя и не так планомерно, как значение минерализации. Максимальные значения наблюдались в 1978-1979 годах (среднее 1,62 г/дм³) и в 2011 году (среднее 1,56 г/дм³). В 80-90-х годах XX века содержание CO₂раств уменьшалось от 1,2-1,3 г/дм³ (80-е годы XX века) до 1,0-0,9 г/дм³ в 2000-2001 гг. Весьма значительное уменьшение в концентрациях CO₂раств наблюдалось в период 2003-2018 года с 1,38 г/дм³ до 0,55 г/дм³.

ТАБЛИЦА 2. ГАЗОВЫЙ СОСТАВ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД НОВОБЛАГОДАРЕНСКОГО УЧАСТКА ЕССЕНТУКСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

№ скв	46			49-Э		
	Температура, °C	34	27	36	44	41
CO ₂ раств, г/дм ³	1,2	1,2	0,8	0,73	0,6	0,7
Общая газонасыщенность, дм ³ /дм ³	1,7	1,5	-	0,72	0,6	-
Спонтанный газ, об. %	He	-	-	0,01	-	0,02
	O ₂	3,9	3,8	3,4	3,4	2
	N ₂		3,9	4,5	9,1	8,2
	CH ₄	8,3			27,0	
			18,5	10,4		26,0
	CO ₂	86,4	79,2	86,0	71,5	66,9
	Другие	-	-	-	-	-

Концентрация CO₂раств. в воде скважины № 46 подвержена большим колебаниям, что обусловлено нестабильностью углекислого газа в системе скважина-водопорода-газ, постоянными фазовыми переходами газовой фазы, методикой отбора, хранения и транспортирования проб воды [1].

ТАБЛИЦА 3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СПОНТАННОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ВОДАХ СКВАЖИНЫ №46 В ТЕЧЕНИЕ ОПЫТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Скважина	Дата отбора	Ar	O ₂	He	N ₂	CH ₄	CO ₂
		об. %					
46	19.02.2020	2,95	0,09	0,03	2,01	4,04	90,88
46	20.03.2020	4,02	0,12	0,04	2,49	4,80	88,53
46	23.04.2020	0,03	0,04	0,03	1,73	4,76	93,41
46	18.05.2020	0,01	0,03	0,03	1,68	4,87	93,38
46	02.06.2020	0,16	0,09	0,02	2,08	3,84	93,81
46	19.06.2020	1,76	-	0,03	1,86	5,02	91,33
46	28.07.2020	0,06	0,06	0,37	1,88	4,80	92,83
46	25.08.2020	0,09	1,19	0,03	5,99	4,73	87,98

ТАБЛИЦА 4. ПРЕДЕЛЫ КОЛЕБАНИЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ И РАСТВОРЕННОЙ УГЛЕКИСЛОТЫ В ВОДАХ СКВАЖИНЫ 49-Э ЗА МНОГОЛЕТНИЙ ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

Период	Отбор, м ³ /сут	Минерализация (мин-макс (сред.)), г/дм ³	CO ₂ раств (мин-макс (сред.)), г/дм ³
Кондиции	-	7,0-10,0	0,5-1,8
1987-1990	42	8,08-8,20 (8,14)	0,37-0,76 (0,53)
1991-1999	36	8,19-8,38 (8,26)	0,56-0,97 (0,75)
2000-2007	39	8,24-8,51 (8,35)	0,45-1,03 (0,76)
2008-2009	59	7,81-8,32 (8,19)	0,32-1,13 (0,66)
2010	73	8,09-8,35 (8,23)	0,37-2,15 (0,68)
2011	65	8,26-8,38 (8,33)	0,45-1,91 (0,96)
2012	76	7,98-8,35 (8,24)	0,37-1,87 (0,70)
2013	79	8,20-8,47 (8,29)	0,31-0,80 (0,53)
2014	77	7,98-8,54 (8,36)	0,04-1,51 (0,73)
2015	76	7,77-8,50 (8,27)	0,48-1,56 (1,00)
2016	76	8,16-8,42 (8,28)	0,34-0,75 (0,55)
2017	76	8,21-8,34 (8,27)	0,39-0,78 (0,60)
2018	79	8,08-8,91 (8,28)	0,36-1,23 (0,60)
2019	76	8,15-8,43 (8,27)	0,37-0,88 (0,62)
2020	74	8,09-8,57 (8,25)	0,34-1,13 (0,66)

Содержание углекислоты в минеральных водах, выдываемых скважиной 49-Э в период с 1987 по 2007 гг., варьировало в широких пределах (от 0,37 до 1,03 г/дм³), и иногда выходило за нижнюю кондиционную границу, вместе с тем, средние значения кондиционны все время наблюдений.

Концентрация углекислоты (CO₂раств) варьировала в широком интервале от 0,04 до 2,15 г/дм³, при средних значениях от 0,53 до 1,0 г/дм³. В долговременном тренде фиксируется незначительное увеличение в содержании углекислоты, при незначительном или неравномерном водоотборе дисперсия значений содержания углекислоты увеличивается [1].

ТАБЛИЦА 5. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СПОНТАННОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ
В ВОДАХ СКВАЖИНЫ 49-Э В ТЕЧЕНИЕ ОПЫТНЫХ
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Скважина	Дата отбора	Ar	O2	He	N2	CH4	CO2
		об. %					
49-Э	19.02.2020	0,09	-	0,12	6,57	35,02	58,20
49-Э	20.03.2020	3,36	-	0,07	4,09	21,61	70,87
49-Э	23.04.2020	0,02	-	0,005	0,53	0,01	99,44
49-Э	18.05.2020	0,54	-	0,07	4,49	22,50	72,40
49-Э	02.06.2020	2,44	0,11	0,07	4,57	21,80	71,01
49-Э	31.07.2020	0,14	0,09	0,72	4,76	23,95	70,33
49-Э	06.07.2020	0,12	0,23	0,63	4,68	22,75	71,59
49-Э	03.09.2020	3,02	1,65	0,31	11,3 9	22,85	60,77

Содержание углекислоты по обеим скважинам характеризуется значительной вариативностью, однако концентрации CO₂раст входят в рамках кондиций. Выявленная хаотичность в содержании CO₂раст обусловлена нестабильностью углекислого газа в системе скважина-вода-порода-газ, изменчивостью температуры воды, методикой отбора, хранения и транспортирования проб воды и увеличивается в периоды неравномерного водоотбора. Данные долговременного мониторинга указывают на стабильность средних значений CO₂раст.

До настоящего времени генезис углекислого газа в гидролитосфере региона КМВ только начинает изучаться, анализируя историю формирования гор лакколитов Бештау, Машук, Бык и т.д. можно сделать предположение, что CO₂ имеет термометаморфическое происхождение. В соответствии с последними исследованиями эти месторождения образуют один Средиземноморский геосинклинальный пояс (включающий в себя Кавказские, Крымские, Балканские и др. Альпиды). [Под редакцией Е.А. Козловского. Средиземноморский геосинклинальный пояс / Горная энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия. – 1984–1991.]

На геоструктурный облик Ессентукского месторождения, как и других месторождений региона КМВ, существенное влияние оказывает литология пород (рис. 2). Так, если изверженные и кристаллические породы могут быть обводнены лишь за счет экзогенной и тектонической трещиноватости, то для осадочных отложений характерны, обычно, пластовые условия залегания и циркуляции минеральных вод. Геоструктурный облик месторождений определяется также и положением их в региональных водонапорных системах. Известно, что области развития углекислых вод пространственно совпадают с молодыми геосинклинальными областями, заключающими различные водонапорные системы трещинных, трещинно-жильных и пластово-трещинных вод.

Формирование месторождений углекислых вод в пределах водонапорных систем обусловлено единым процессом – внедрением глубинной CO₂ по тектоническим разрывным нарушениям и интрузивным контактам.

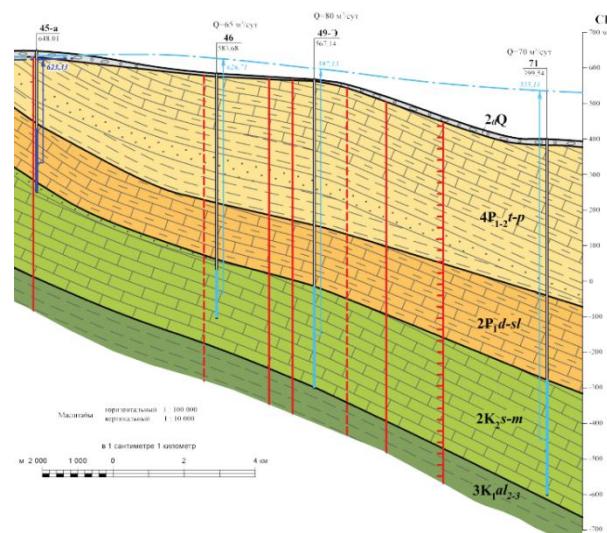


Рис. 2. Геологический разрез

Насыщенные углекислотой воды в гидродинамическом отношении составляют единое целое с водонапорной системой и, занимая определенное положение в ней, могут проявляться на поверхности в виде очагов разгрузки. Л.А. Яроцкий, по характеру выхода минеральных вод на поверхность, подразделяет очаги разгрузки на открытые и закрытые, морфология которых определяется сочетанием геоструктурных и эрозионных элементов, а также гидродинамическими особенностями водонапорных систем.

Методы: для понимания процессов построена математическая модель гидролитосферных процессов месторождения в следующем виде:

$$\frac{\partial H_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta} \left(k_x \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) + V_j(\tau) \cdot \delta(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j})$$

Водоносный пласт (Сеноман-Маахстріктский горизонт),

$$0 < x < L_x ; 0 < y < L_y ; 0 < z < L_z$$

где h1 – напор в горизонте грунтовых вод;

Hi – напор в изучаемом i-м водоносном горизонте (Сеноман-Маахстріктский горизонт);

$k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$ – коэффициенты фильтрации по пространственным координатам в горизонте грунтовых вод (i=1); η – упругоемкость пласта;

$V_j(\tau) = -K_j \cdot Q_j(\tau)$ – понижение напора, вызванное воздействием j-ой добывающей скважины;

K_j – коэффициент, определяемый с использованием опытно-фильтрационных работ;

$\delta(x_0,j, y_0,j)$ – функция, равная единице, если $x=x_0,j$, $y=y_0,j$, и равная нулю в других случаях (рассматривается совершенный водозабор);

x,y,z – пространственные координаты;

τ – время.

Границные условия задаются в виде

Нижняя граница пласта

$$\partial H_1(x, y, L_{z_1}, \tau) / \partial z = 0.$$

Боковые грани.

$$H_1(0, y, z, \tau) = H_{1,0},$$

$$\frac{\partial H_1(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0.$$

При формировании граничных условий по координате y , полагаем, что возмущения от добывающих скважин не влияют на состояние пласта в граничных точках:

$$H_1(x, 0, z, \tau) = H_1(x, L_y, z, \tau) = H_{0_1},$$

H_{0_1} – начальное состояние невозмущенного пласта.

Поскольку приведенная математическая модель объекта управления не имеет аналитического решения, то для оценки динамики объекта составим дискретную модель гидролитосферных процессов рассматриваемого пласта.

2. Дискретная модель объекта управления

Используя приведенную выше математическую модель объекта управления, запишем дискретную модель [19].

Водоносный горизонт

$$\begin{aligned} \Delta H_{1,\eta,\gamma,\xi} &= \frac{1}{\eta_1} (k_{1,x} \frac{H_{1,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot H_{1,\eta,\gamma,\xi} + H_{1,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta x)^2} + \\ &+ k_{1,y} \frac{H_{1,\eta,\gamma-1,\xi} - 2 \cdot H_{1,\eta,\gamma,\xi} + H_{1,\eta,\gamma+1,\xi}}{(\Delta y)^2} + \\ &+ k_{1,z} \frac{H_{1,\eta,\gamma,\xi-1} - 2 \cdot H_{1,\eta,\gamma,\xi} + H_{1,\eta,\gamma,\xi+1}}{(\Delta z_1)^2}) + V_j(\tau) \\ &\cdot \delta(x_{0,j}, y_{0,j}), \end{aligned}$$

$$2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1; 2 < \xi < N_{z_1} - 1,$$

где N_x, N_y – число точек дискретизации по координатам x и y соответственно; N_z – число точек дискретизации пласта по координате z [4].

$x_{0,j}, y_{0,j}$ – координаты добывающих скважин ($j=1..N$);

Аналогичным образом запишем дискретные модели граничных условий.

Нижняя граница нижнего пласта

$$H_{1,\eta,\gamma,N_z} = H_{1,\eta,\gamma,N_z-1},$$

$$2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1.$$

Боковые грани.

$$H_{1,1,\gamma,\xi} = H_{1,0}, \quad H_{1,N_x,\gamma,\xi} = H_{1,N_x-1,\gamma,\xi},$$

$$H_{1,\eta,1,\xi} = H_{1,\eta,N_y,\xi} = H_{0,\eta}.$$

II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отличие рассматриваемой модели от ранее известных это наличие существенного газового фактора, а также зависимость химического состава гидроминерального сырья от дебита скважин (водоотбора). (По сути, рассматриваемая выше модель описывает понижение уровня газо-водяной смеси. При этом, если в добывающей скважине давление становится меньше 6 атм., то наблюдается переход углекислого газа из жидкого состояния в газообразную фазу (борботация)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов А.А. и др. Отчет о геологическом изучении недр «Переоценка запасов минеральных подземных вод Новоблагодарненского участка Ессентукского месторождения». – М.: Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. – Государственный регистрационный № 07-19-330 от 03.06.2019 г.
2. Зорькин Л.М. Генезис газов подземной гидролитосферы (в связи с разработкой методов поиска залежей углеводородов. – 17 с.
3. Панкина Р.Г., Мехтиева В.Л. Происхождение кислых газов (H2S и CO2) и прогнозирование их содержания в углеводородных скоплениях. Обзор МИНГeo СССР, ВНИИГНИ, ВНЭМС. Геология, методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. – М., 1983.
4. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: Изд-во «РИО КМВ», 2002. – 212 с.
5. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.
6. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами: проблемы и перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 2-10.
7. Малков А.В., Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидролитосферными процессами. – М.: Научный мир, 2007. 6 – 258 с.
8. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
9. Суразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1977. – 479 с.
10. Григорьев В.В., Быстров С.В. Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов: учебное пособие. – Изд.-во С-Пб ГУИТМО-2011. – 200 с.
11. Grigoriev V.V., Mansurova O.K. Qualitative exponential stability and instability of dynamical systems. Preprints of 5th IFAK Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS'01). – St.-Petersburg, 2001.
12. Григорьев В.В., Быстров С.В., Рабыш Е.Ю., Мансурова О.К. Использование условий качественной неустойчивости для оценки динамических процессов // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. – СПб., 2012. – Т. 77, № 1. – С. 41-46.
13. Быстров С.В., Григорьев В.В., Рабыш Е.Ю., Мансурова О.К. Анализ качества переходных процессов в непрерывных и дискретных системах на основе условий качественной экспоненциальной устойчивости // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – М., 2012. – № 9. – Методы теории автоматического управления. – С. 32-36. - 5 с. - ISSN 1684-6427.
14. Григорьев В.В., Быстров С.В., Наумова А.К., Рабыш Е.Ю., Черевко Н.А. Использование условий качественной экспоненциальной устойчивости для оценки динамических процессов. // Известия вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 6. – С. 24-30.
15. Григорьев В.В., Быстров С.В., Мансурова О.К., Першин И.М. Анализ устойчивости линейных систем с распределенными параметрами. Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 9. – С. 2-5.

16. *Воронов А.А.* Основы теории автоматического управления. Особые линейные и нелинейные системы. – М.: Энергия, 1981. – 303 с.
17. *Першин М.И.* Проектирование систем управления параметрами Кисловодского месторождения минеральных вод // Технологии развития курортно-рекреационного комплекса СКФО: Сборник научных трудов. Т. 1. – Изд.-во ФГАОУ ВПО СКФУ, 2014. – С. 141-154.
18. *Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И.* Синтез распределенных систем управления гидролитосферными процессами месторождений минеральных вод // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8. – С. 123-137.
19. *Бочевер Ф.М.* Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. – М.: Недра, 1968. – 325 с.
20. *Першин И.М., Малков А.В., Цаплева В.В.* Технологическая безопасность эксплуатации гидроминеральных источников // Журнал Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4. – С. 25-31.
21. *Першин И.М., Помеляйко И.С.* Системный анализ экологического состояния зоны гипергенеза курорта Кисловодска // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2013. – № 3 (36). – С. 74-80.
22. *Малков А.В., Першин И.М., Цаплева В.В.* Технологическая безопасность эксплуатации гидроминеральных источников // Журнал Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4. – С. 25-31.

Методы исследования эрозионно–русловых процессов

Георгиева Марьяна Альбековна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
maryana.g@list.ru

Аннотация. Эрозионно-русловые процессы представляют собой совокупность процессов разрушения, переноса и отложения верхних слоев почвы и горных пород под действием водных потоков. Эти процессы начинаются с разрушения почвы или горной породы под воздействием силы водяного потока. Разрушенный материал переносится потоком в видезвеси или по дну в виде донных отложений. Донные отложения представляют собой более крупные частицы, которые перемещаются по дну под действием силы трения. Переносимый материал откладывается в местах, где скорость потока замедляется. Это происходит в местах изгибов русла, за препятствиями или при впадении потока в более крупный водоем.

Abstract. Erosion-bed processes are a set of processes of destruction, transfer and deposition of upper layers of soil and rocks under the influence of water flows. These processes begin with the destruction of soil or rock under the influence of the force of a water flow. The destroyed material is transported by the flow in the form of suspension or along the bottom in the form of bottom sediments. Bottom sediments are larger particles that move along the bottom under the influence of friction. The transported material is deposited in areas where the flow rate slows. This occurs in places where the channel bends, behind obstacles, or when the stream flows into a larger body of water.

Ключевые слова: методы исследования, системный анализ, эрозионно-русловые процессы, математические модели гидролитосферных процессов.

Key words: research methods, system analysis, erosion-bed processes, mathematical models of hydrolithospheric processes.

I. ВВЕДЕНИЕ

Кабардино-Балкарская Республика расположена в предгорьях и горах Северного Кавказа, где крутые склоны и интенсивные осадки способствуют эрозии почв. Почвы республики преимущественно представлены рыхлыми осадочными породами, которые легко поддаются разрушению эрозионными процессами. Обильные осадки, в том числе ливневые дожди, создают благоприятные условия для развития эрозии. Однако деятельность человека также усиливает эрозионные процессы в республике. Вырубка лесов уменьшает количество растительности, которая удерживает почву на склонах. Пере выпас скота приводит к уплотнению почвы и уменьшению ее способности поглощать воду. Нерациональное

использование земель, такое как распашка крутых склонов, также способствует эрозии. Кроме того, строительство на склонах может нарушить естественный сток воды и увеличить риск возникновения оползней и селей. Отсутствие или недостаточные меры по борьбе с эрозией усугубляют проблему. Террасирование склонов, облесение и укрепление берегов рек могут помочь уменьшить эрозию и сохранить почвы. Однако эти меры часто требуют значительных финансовых и трудовых затрат, и их внедрение может быть ограниченным. В результате эрозионных процессов Кабардино-Балкарская Республика теряет ценные почвенные ресурсы. Это приводит к снижению плодородия почв, ухудшению качества воды и увеличению риска природных катастроф. Необходимо принимать срочные меры по борьбе с эрозией, чтобы сохранить природные ресурсы республики и обеспечить ее устойчивое развитие.



Рис. 1. Водная эрозия



Рис. 2. Обвал береговой зоны русла р. Малка

Сочетание этих разрушительных факторов, привело к серьезным эрозионно-русловым процессам, которые представляют значительную угрозу для окружающей среды, экономики и благополучия населения республики [2].

Проблемы, связанные с эрозионными процессами в регионе, включают:

1. Разрушение берегов рек и озер. Активное руслоформирование рек Терек, Малка, Чегем, Нальчик и др. приводит к подмыву и обрушению берегов, разрушая инфраструктуру, жилые дома и сельскохозяйственные угодья. Береговая эрозия также наблюдается на озерах Сылтран-Кель, Гижgit и Тамбукан.

2. Накопление аллювия и заиление русел. Смыт почвы с горных склонов приводит к накоплению аллювия в руслах рек, уменьшая их пропускную способность и уве-

личивая риск наводнений. Заиление русел также происходит из-за выноса осадочного материала из боковых притоков и оврагов.

3. Оврагообразование и образование промоин. Разрушение почвенного покрова и интенсивные осадки способствуют развитию оврагов и промоин, которые постепенно расширяются и углубляются. Овраги и промоины нарушают целостность почвенного профиля, снижают продуктивность земель и угрожают расположенным рядом населенным пунктам.

4. Изменение русел рек и подтопление территорий. Эрозионно-русловые процессы приводят к изменению русел рек, образованию новых русел, меандров и стариц. Изменения русел рек могут привести к подтоплению прилегающих территорий, разрушению дорог, мостов и других объектов инфраструктуры.

5. Загрязнение водоемов. Эрозионно-русловые процессы способствуют выносу загрязняющих веществ, таких как пестициды, удобрения и тяжелые металлы, в водоемы. Загрязнение водоемов отрицательно сказывается на качестве воды, рыбных запасах и здоровье населения.

6. Ухудшение экологического состояния территории. Эрозионно-русловые процессы приводят к деградации почв, снижению биоразнообразия и изменению ландшафтов. Разрушение берегов рек и озер нарушает естественные экосистемы и приводит к потере ценных природных ресурсов.

Структура водных ресурсов в регионе Кабардино-Балкария оказывает существенное влияние на процессы водной эрозии. Одним из распространенных примеров является эрозия береговой линии, когда размывается побережье, образуя опасные обрывы и оползни.

На рис. 3 и 4 показан облав берега русла реки Малка в центральном парке города Прохладный Кабардино-Балкарской республики.



Рис. 3. Водная эрозия



Рис. 4. Обвал береговой зоны

II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭРРОЗИОННО-РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Грунтовые воды играют существенную роль в эрозионных процессах, влияя на:

- Эрозию склонов, где высокий уровень грунтовых вод может привести к подмыванию склонов, ослабляя почву и увеличивая ее восприимчивость к оползням и обвалам. Низкий уровень грунтовых

вод способствует осушению почв, что приводит к образованию трещин и увеличению поверхностного стока, усиливая эрозию.

- Эрозию русел, где в низменностях грунтовые воды могут подпитывать реки и ручьи. Во время наводнений высокая скорость течения может размывать берега, углубляя русла рек и вызывая береговую эрозию. В засушливых районах низкий уровень грунтовых вод может снижать расход воды в реках, что способствует аккумуляции и формированию речных террас.
- Образование эрозионных форм рельефа, где понижение уровня грунтовых вод может способствовать образованию карста, провальных воронок и озер. Высокий уровень грунтовых вод может привести к заболачиванию, создавая среду, благоприятную для торфообразования и образования болот.

Грунтовые воды, находящиеся близко к поверхности земли, могут формировать ландшафт различными способами:

- грунтовые воды могут подмывать берега, образуя углубления и пещеры.
- грунтовые воды размягчают почву, она может начать медленно сползать, образуя ямы и углубления.
- грунтовые воды, протекающие через пористые породы, могут растворять их, образуя пещеры и подземные реки.

Проще говоря, грунтовые воды могут размывать землю, вызывая оползни и создавая различные особенности ландшафта, такие как пещеры и подземные реки.

Как известно, поверхностные воды на склоновых земельных участках связаны с грунтовыми водами, которые, в свою очередь, могут быть связаны в водоносными горизонтами. Рассмотрим математические модели рассматриваемых процессов и опишем математические модели взаимосвязи рассматриваемых процессов [3].

2.1. Математические модели эрозионных процессов на склоновых земельных участках

В исследовании Васильева С.А. "Математическая модель для прогноза эрозионных процессов на склоновых земельных участках" при анализе движения водного потока вдоль склона можно увидеть основные закономерности, объединяющие параметры потока и характеристики поверхности, которые определяются воздействием на них движущих и сопротивляющих сил. Воздействие этих сил, которые либо ускоряют, либо замедляют движение воды, учитывая ее скорость, может быть описано с использованием мощностного баланса.

$$N_a = N_\psi + N_\varphi + N_\delta + N_\gamma + N_j, \quad (1)$$

где N_a – мощность водного потока, Дж/с;

N_Ψ – потери мощности водного потока на размыв подстилающей поверхности склона, Дж/с;

N_φ – потери мощности водного потока на преодоление силы сопротивления шероховатости подстилающей поверхности склона, Дж/с;

N_δ – потери мощности водного потока на преодоление силы сопротивления растительных элементов на поверхности склона, Дж/с;

N_γ – потери мощности водного потока, обусловленные влиянием волнистости подстилающей поверхности склона, Дж/с;

N_j – потери мощности водного потока, обусловленные влиянием инерции потока, Дж/с.

Для сравнения водных потоков, движущихся по разным подстилающим поверхностям склона и выявления резервов энергии водного потока, которые могут, например, ускорить поток или размыть микрорусло, уравнение мощностного баланса водного потока приведены к безразмерной форме разделив все его составляющие на произведение веса и скорости потока:

$$i = i_\varphi + i_\psi + i_\delta + i_\gamma + i_j + i_s = i_c + i_\psi + i_j + \\ + i_s = \sum i_\lambda, \quad (2)$$

где i – уклон подстилающей поверхности;

i_φ – уклон гидравлических потерь на трение;

i_ψ – уклон гидравлических потерь на размыв подстилающей поверхности склона;

i_δ – уклон гидравлических потерь на преодоление растительных элементов;

i_γ – уклон гидравлических потерь на преодоление волнистости поверхности;

i_j – уклон гидравлических потерь на преодоление инерции потока;

i_s – уклон гидравлических потерь на взвешивание твердых частиц;

i_c – уклон гидравлических потерь на преодоление стокоформирующей поверхности;

$\sum i_\lambda$ – сумма уклонов гидравлических потерь при движении водного потока по стокоформирующей поверхности.

Исследованная Васильевым С.А. математическая модель демонстрирует равновесие между реальным уклоном поверхности и суммой уклонов, обусловленных потерями воды при движении по форме дна речного русла [5].

Согласно работе Бейшикеева К.К. интенсивность капельно-дождевой эрозии в настоящей модели можно определять с помощью зависимости

$$D_R = I^a i a K_1 H, \quad (3)$$

где

D_R – масса выбитой каплями почвы, поступающей в поверхностный поток с единицы площади в единицу времени, кг $M^{-2} c^{-1}$;

I – интенсивность осадков, см/ч;

a – параметр меняющийся от 1.5 до 2.1 в зависимости от процентного содержания глины в почве r ($a = 2.1 - 0.01r$);

i – уклон, м/м;

a – часть площади склона, свободная от растительности, камней и других факторов, препятствующих капельной эрозии;

K_1 – эмпирический параметр, характеризующий эрозионную способность почв;

H – коэффициент, учитывающий влияние глубины поверхностного потока на ударное действие дождевых капель.

В практических расчетах можно ограничиться несколькими глубинами различной обеспеченности. Для этого на теоретической кривой обеспеченности выбирают интервалов $[0, P_1], [P_1 P_2] \dots, [P_{m-1}, 1]$.

Величина каждого интервала $f_j = P_t - P_{t-1}$ представляет собой долю площади склона, в пределах которой поверхностный поток имеет глубину h_i . Глубине h_i , соответствует интенсивность капельной эрозии D_{Ri} . Средневзвешенная величина D_{Ri} в этом случае определяется по формуле:

$$D_R = \sum_i^m D_{Ri} f_i. \quad (4)$$

Интенсивность смыва почвы поверхностным склоновым потоком рассчитывается с помощью соотношения:

$$D_F = \beta K_2 (\tau - \tau_0), \quad (5)$$

где

D_F – масса почвы, поступающая в поверхностный поток в результате смыва с единицы площади в единицу времени, кг $M^{-2} c^{-1}$;

β – коэффициент, характеризующий условия смыва (близкий по смыслу к части площади поверхности участка склона, на которой возможен смыв почвы);

K_2 – эмпирический коэффициент, с/м, аналогичный параметру K_1 в предыдущей формуле ();

τ – касательное напряжение, н/ M^2 , создаваемое поверхностным потоком, $\tau = pg h i$, где p – плотность воды, кг/ M^3 ,

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; τ_0 – критическое касательное напряжение, при котором начинается отрыв почвенных частиц, Н/ M^2 .

С учетом принятого закона распределения глубин на участке склона величина касательного напряжения в потоке глубиной h_i составит τ_i , а величина интенсивности эрозии смыва – D_{Fi} . Суммарная интенсивность эрозии смыва определяется аналогично суммарной интенсивности капельно-дождевой эрозии по формуле [6]:

$$D_F = \sum_i^m D_{Fi} / i. \quad (6)$$

Шекихачев Ю.А. в своей работе пишет, что широкую проверку прошла модель смыва, предложенная Г.И. Швебсом. Ее основу составляет гидрометеорологический параметр, который определяется для ливневого смыва с учетом величины и характера осадков [4].

Величину ливневого смыва W_{lo} рассчитывают по формуле:

$$W_{lo} = 1,2 - 10^{-4} j_r e^{-\lambda_p(0,85-100m)} \Phi(L;J) \sum_{i=1}^m K_i, \quad (7)$$

где j_r – показатель относительной смываемости почвы;

λ_p – параметр функции влияния растительности на смыв почвы;

$\Phi(L;J)$ – рельефная функция;

K – гидрометеорологический фактор ливневого поверхностного смыва.

Для весеннего периода величину смыва W_b определяют по формуле:

$$W_b = 10^{-5} j_p C_3 \lambda_{pb} p_b \Phi(L;J) \eta \Delta X_b, \quad (8)$$

где j_p – частная характеристика относительной смываемости почвы;

C_3 – коэффициент, характеризующий влияние экспозиции;

λ_{pb} – параметр, учитывающий состояние подстилающей поверхности;

p_b – мутность потока;

η – средний коэффициент стока;

X_b – среднегодовые запасы воды в снеге.

В исследовании Магомедовой М.Р. «Моделирование эрозионных процессов в открытых руслах» Г.К. Синявский предлагает описывать состав русловых отложений гаммараспределением:

$$n(d) = \frac{1}{r(\alpha)\beta^\alpha} \cdot d^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{d}{\beta}\right)^2, \quad (9)$$

где $d > -1$, $\beta > 0$, $r(\alpha)$ – гамма функция.

Многочисленные связи, необходимые для описания размерных составов грунтов русел и осадков, указывают на огромное разнообразие этих составов и невозможность их точного описания с помощью одного вида зависимости. Поэтому в большинстве случаев при расчетах эрозии для учета размерного состава грунта используются не функции распределения, а их числовые характеристики.

Форму кривой распределения достаточно полно характеризуют четыре числовые характеристики: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и эксцесс. Однако на практике, применительно к описанию гранулометрических составов грунтов, получила распределение только первая из них – средневзвешенный диаметр частиц:

$$d_{cp} = \frac{\sum d_i P_i}{\sum P_i}, \quad (10)$$

где d_i – средний диаметр частиц i -ой фракции, равный полусумме крайних размеров ее частиц, P_i – относительное весовое содержание этой фракции в смеси [7].

2.2. Математическая модель грунтовых вод

В соответствии с [1], запишем уравнения, описывающие рассматриваемый гидролитосферный процесс, в безнапорном, однородном пласте (грунтовых водах), без учета инфильтрации:

$$\frac{\partial h_1(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = k_{1,x} \frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial z^2} \quad (11)$$

$$k_{1,x} = \bar{K}_x h_{cp}/\mu, k_{1,y} = \bar{K}_y h_{cp}/\mu, k_{1,z} = \bar{K}_z h_{cp}/\mu, \quad (12)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < l_z$$

где x, y, z – пространственные координаты;

τ – время;

h_1 – напор в горизонте грунтовых вод;

$k_{1,x}, k_{1,y}, k_{1,z}$ – коэффициенты уровнепроводности по соответствующим координатам в $m^2/\text{сут}$;

$\bar{K}_x, \bar{K}_y, \bar{K}_z$ – коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам;

h_{cp} – средний уровень грунтовых вод; μ – коэффициент грунтовой водоотдачи;

L_x, L_y, L_z – заданные значения.

Боковые грани, при отсутствии взаимодействия с водоносным горизонтом:

$$h_1(0, y, z, \tau) = h_{1,0}; \frac{\partial h_1(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial h_1(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = 0; \frac{\partial h_1(x, L_y, z, \tau)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial h_1(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0.$$

Изменение уровня поверхностных вод:

$$\Delta h(x, y, L_{z_1}, \tau) = b_{1,p}(h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)). \partial \tau$$

$b_{1,p}$ – параметр перетекания

Боковые грани, при взаимодействии с водоносным горизонтом

Грунтовые воды – водоносный горизонт

Поскольку значение коэффициента перетекания меняется, то граничные условия записываются в виде:

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y$$

$$b_{1,t} = b_1$$

$$If((x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2)^{0.5} \leq R \text{ then } b_{1,t} = b_{1,k},$$

$$h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) = h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) + b_{1,t}(H_2(x, y, L_{z_1}, \tau)) \partial \tau$$

$$H_2(x, y, 0, \tau) = H_2(x, y, 0, \tau) - b_{1,t}(H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)) \partial \tau$$

b_1 – параметр перетекания

Боковые грани.

$$h_1(0, y, z, \tau) = h_{1,0}; H_2(0, y, z, \tau) = H_{2,0},$$

$$\frac{\partial h_1(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0; \frac{\partial H_2(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0$$

$$\begin{aligned}\partial h_1(x, 0, z, \tau) / \partial y &= 0; \partial H_2(x, 0, z, \tau) / \partial y = 0 \\ \partial h_1(L_y, y, z, \tau) / \partial y &= 0; \partial H_2(x, L_y, y, z, \tau) / \partial y = 0 \\ \partial H_2(x, y, Z_2, \tau) / \partial z &= 0.\end{aligned}$$

При этом, математическая модель водоносного горизонта записывается в виде [ссылка на твою статью в нашем сборнике]

Математическая модель, описывающая процессы в водоносных горизонтах, имеет вид []:

$$\frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_2} \left(k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (13)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z_2}$$

где $k_{2,x}, k_{2,y}, k_{2,z}$ – коэффициенты фильтрации по пространственным координатам; H_2 – напор в водоносном горизонте; η_2 – упругоемкость.

К рассматриваемому уравнению добавляются граничные и начальные условия.

Боковые грани.

$$H_2(0, y, z, \tau) = H_{2,0}; \partial H_2(L_x, y, z, \tau) / \partial x = 0$$

$$\partial H_2(x, 0, z, \tau) / \partial y = 0; \partial H_2(x, L_y, z, \tau) / \partial y = 0$$

$$\partial H_2(x, y, Z_2, \tau) / \partial z = 0.$$

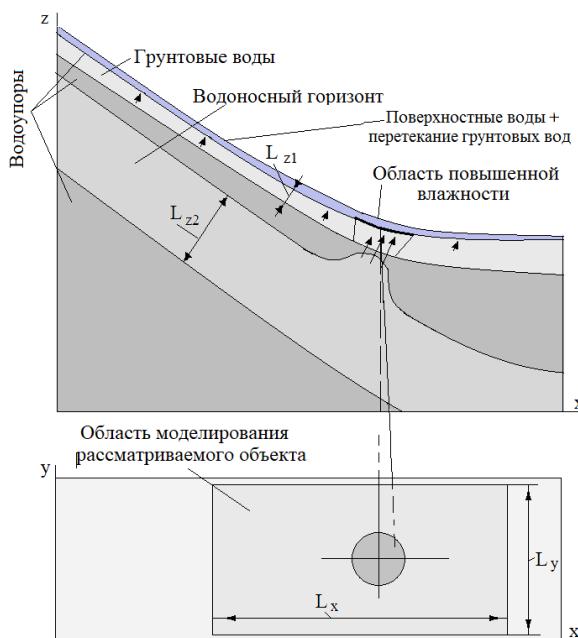


Рис. 5. Схема моделирования

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение эрозионно-речевых процессов является ключевым элементом в понимании динамики рельефа, управления водными ресурсами и прогнозирования рисков, связанных с эрозией. В данной статье был представлен обзор методов исследования эрозионно-речевых процессов, охватывающих как традиционные подходы, так и современные технологии.

Традиционные методы (визуальные наблюдения, геоморфологическое картирование, анализ отложений) предоставляют важную информацию о истории методов исследования. Комбинирование традиционных и современных методов позволяет получить более и динамике процессов, но часто ограничены пространственным и временными разрешением.

Современные методы (дистанционное зондирование, ГИС-технологии, численное моделирование) позволяют получать более точную и детальную информацию о процессах эрозии и транспорта наносов. Эти методы также позволяют прогнозировать эволюцию рельефа и оценивать эффективность мер по борьбе с эрозией. Важной тенденцией является интеграция разных и динамики процессов, но часто ограничены пространственным и временными разрешением. Важной тенденцией является интеграция разных методов исследования. Комбинирование традиционных и современных методов позволяет получить более полное и точное представление о процессах эрозии и разработать более эффективные стратегии управления водными ресурсами.

В будущем развитие методов исследования эрозионно-речевых процессов будет направлено на:

- Повышение точности и разрешения измерений.
- Улучшение моделей эрозии и транспорта наносов.
- Разработку инструментов для прогнозирования рисков эрозии.

Изучение эрозионно-речевых процессов является необходимым условием для обеспечения устойчивого развития водных ресурсов и сохранения биоразнообразия. Дальнейшее развитие методов исследования в этой области будет способствовать более эффективному решению проблем, связанных с эрозией и изменениями рельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Першин И.М., Малков А.В., Першин М.И. Математические модели гидролитосферных процессов // Недропользование XXI век. – 2018. – №. 3. – С. 56-65.
2. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Синтез распределенных систем управления гидролитосферными процессами месторождений минеральных вод // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8 (157).
3. Георгиева М.А. Системный анализ эрозионно-речевых процессов // Современная наука и инновации. – 2023. – № 4 (44). – С. 32-40.
4. Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З. Моделирование процесса водной эрозии на склоновых землях Кабардино-Балкарской Республики // Наука и мир. – 2014. – №. 2-1. – С. 193-194.
5. Васильев С.А. Математическая модель для прогноза эрозионных процессов на склоновых агроландшафтах // Вестник ОГУ. – 2015. – № 9 (184).
6. Байшекеев К.К. и др. Математическое моделирование водно-эрэзионных процессов на проточных водоемах // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2015. – №. 6. – С. 46-48.
7. Магомедова М.Р. Моделирование эрозионных процессов в открытых руслах // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2021. – № 4.

Секция IV

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В АСТРОФИЗИКЕ, ГЕОФИЗИКЕ И ИНЖЕНЕРНЫХ НАУКАХ

DOI: 10.18522/syssyn-2024-41

Статистические оценки астрономической видимости IP-подсмотра по Полярной звезде

Шалдырван Игорь Викторович
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
blackflamberg6@yandex.ru

Комаров Владимир Владимирович
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
komarov@sao.ru

Фокин Максим Юрьевич
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
maksimfokin01@gmail.com

Аннотация. В данной работе приводятся статистические оценки качества изображений разработанного в САО РАН IP-подсмотра по Полярной звезде. Оценки проводятся на основе метода мониторинга дифференциального движения Полярной звезды в поле зрения камеры. Показаны первичные результаты работы данной системы в сравнении с наблюдательными оценками качества изображения, полученными на телескопах БТА и Цейсс-1000.

Abstract. This paper presents statistical assessments of astronomical seeing of the IP surveillance camera aUMi, developed at the SAO RAS. The estimates are based on the method of differential image motion monitoring of the North Star in the camera's field of view. The primary results of the operation of this system are shown in comparison with observational assessments of image quality obtained on the BTA and Zeiss-1000 telescopes.

Ключевые слова: CMOS-матрица, IP-камера, seeing.

Key words: CMOS-sensor, IP-camera, seeing.

I. ВВЕДЕНИЕ

Системы ночного видения в Специальной Астрофизической Обсерватории (САО) РАН (от научных камер до охранных систем) являются необходимой частью наблюдательного процесса в астрофизических исследованиях. В процессе наведения, сопровождения наблюданного источника, а также коррекции ведения телескопа ведется постоянный мониторинг изображений подсмотровыми камерами. Также, необходим постоянный контроль погодной обстановки в районе телескопов, мониторинг небесной полусфера, облачности, осадков и других важных метео-параметров. 20 лет назад был разработан и внедрен в эксплуатацию на Верхней научной площадке (ВНП) цифровой телевизионный комплекс Большого телескопа азимутального (БТА) и оптического телескопа с диаметром главного зеркала 1 метр – Цейсс-

1000, который работает до сих пор при постоянной модернизации [1]. Для этого комплекса мы подбираем высокочувствительные матрицы массового производства [2], позволяющие создавать десятки камер для подсмотров научной аппаратуры, гидов телескопов, обзоров ночного неба, подкупольных камер, для которых нельзя использовать инфракрасную подсветку.

К проблеме видеомониторинга в САО РАН относится не только получение изображений ночного неба в видимом диапазоне спектра системами обзора ночного неба и гидами телескопов, но и исследование изображений звезд, позволяющее вычислять значение астрономической видимости, обусловленной состоянием атмосферы (seeing).

Для вычисления seeing в условиях ВНП нами был выбран классический метод мониторинга дифференциального движения изображения (Differential-Image-Motion-Monitor – DIMM) [3] с неклассическим исследованием большого количества изображений, полученных посредством одной апертуры (одного прибора получения изображений), данный метод применили к исследованию изображений Полярной звезды.

Нами была приобретена серийная IP-камера с CMOS-матрицей Sony и объективом с фокусным расстоянием (FL)=63.5 мм, с полем зрения 5.7 угл. град. Был смоделирован и исполнен в атмосферостойких материалах корпус подсмотровой камеры.

Данная камера была установлена на ВНП на крыше телескопа Цейсс-1000. Наведена камера на полярную область неба. Серии из 100 изображений сохраняются на сервер локальной сети с последующей их обработкой круглосуточно с периодичностью в 20 мин. Для технических нужд из локальной сети также возможен доступ к прямому потоку видеосигнала с этого подсмотра.

II. СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ

Как указано в работах [3, 4] приведены уравнения, позволяющие связать величину дисперсии положения центра изображения, диаметр телескопа D_m и параметр Фрида r_0 :

$$\sigma_*^2 = K \cdot \lambda^2 \left(\frac{1}{r_0} \right)^{5/3} \cdot \left(\frac{1}{D_m} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Вывод из данной формулы – для создания прибора исследования seeing по данному методу желательно использовать объектив небольшого диаметра. В этом случае дисперсия растет и ее можно измерять с большей точностью.

Все дальнейшие вычисления проводятся для $\lambda = 550\text{нм}$ ($5.5 \times 10^{-7}\text{м}$). Параметр K зависит от отношения расстояния между апертурами к диаметру апертур (для DIMM). В случае нулевого расстояния (одна апертура в нашем случае) $K = 0.358$. Из работы [4] следует, что в нашем случае параметр Фрида вычисляется как:

$$r_0 = \left(\frac{0.358 \cdot \lambda^2}{\sigma_*^2} \right)^{0.6} \cdot \left(\frac{1}{D_m} \right)^{0.2}. \quad (2)$$

Параметр Фрида определяет seeing – FWHM изображения ограниченного атмосферной турбулентностью для телескопа произвольного диаметра:

$$FWHM(\text{rad}) = 0.98 \cdot \frac{\lambda}{r_0}$$

или: (3)

$$FWHM(\text{arc sec}) = 0.98 \cdot \frac{\lambda}{r_0} \cdot 206265$$

Это соотношение похоже на определение критерия Рэля (разрешающая способность), но вместо диаметра объектива используется параметр Фрида.

В нашем примере, в отличие от классического DIMM, используется одна апертура для получения множества изображений Полярной звезды без гидирования, для данных вычислений требуется серия снимков с короткими интервалами между снимками и короткими экспозициями, что позволяет получать камеры с CMOS-матрицами.

Имея возможность конвертации получаемых при помощи IP-камер изображений в формат .fits, мы получаем возможность исследования различных параметров изображения звезд [5]. Для вычисления seeing по серии изображений Полярной звезды была приобретена IP-камера с CMOS-матрицей Sony IMX335 с разрешением 2592×1944 , форматом изображения 4/3, и объективом с фокусным расстоянием (FL)=63.5 мм, с полем зрения H=4.24 и V=3.18 угл. град. Расчеты показывают, что при использовании данных камеры и объектива в получаемом изображении 1 пиксель имеет угловой размер $\approx 6''$. Это было проверено посредством астрометрирования изображения, полученного аналогичной парой камера-объектив, установленной на кабине СПФ БТА, результаты показаны на рис. 1.

Был смоделирован и исполнен в атмосферостойких материалах корпус для камеры. Размеры корпуса камеры не превышают $10 \times 10 \times 10$ см и позволяют избежать колебаний системы из-за ветровых нагрузок.

CMOS-матрица Sony IMX335 позволяет получить изображения пятна Полярной звезды размером в 20-40 пикселей без перекопов и с равномерным темным фоном на короткой экспозиции (0.1428 с) не представляет трудности.

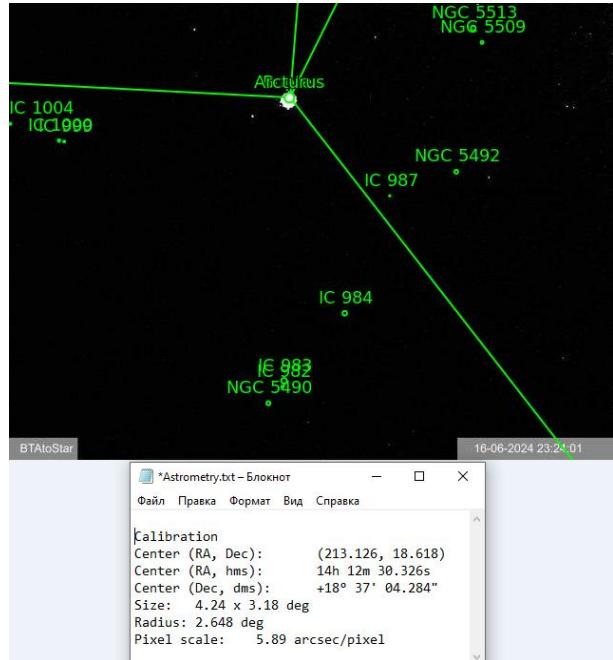


Рис. 1. Результат астрометрирования изображения, полученного парой камера-объектив, аналогичной системе мониторинга Полярной звезды, установленной на кабине СПФ БТА

Как описано в работе [5], используя библиотеки Python: numpy, scipy, matplotlib, os, pylab, astropy, по сконвертированным в формат .fits с помощью ПО ImageMagick изображениям с данной камеры, были вычислены центр фигуры (центройд) Полярной звезды и значение полной ширины на половине максимума (FWHM) звезды, а по данным значениям вычислены значения астрономической видимости, обусловленной состоянием атмосферы (seeing) и радиуса Фрида (r0). Имея эти значения и зная широту, на которой установлена данная камера, не представляет сложности вычисление значений seeing и r0 в зените.

Результаты измерений сохраняются в виде таблицы формата .csv и хранятся на сервере в локальной сети САО РАН, а также выводятся на веб-страницу в виде графика, как показано на рис. 2.

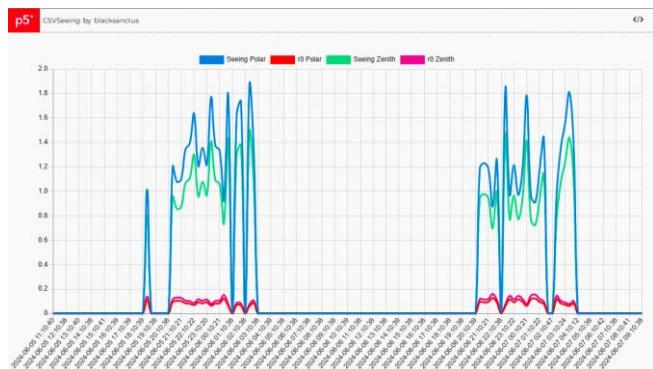


Рис. 2. График с выведенными на нее данными seeing

III. ПЕРВИЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ

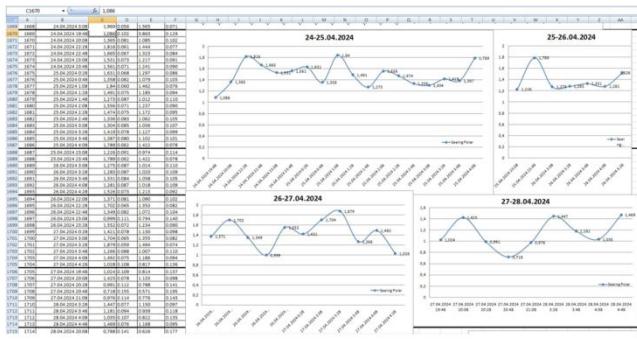


Рис. 3. Таблица с графиками изменения seeing за ночь

Данная система установлена на ВНП САО РАН, первые измерения seeing получены в ночь 26-27 сентября 2023 г. За период с сентября 2023 г. по 05 июня 2024 г. было получено 1917 измерений seeing и r_0 по Полярной звезде. Эти измерения сформированы в таблице формата .csv и сохранены на сервере в локальной сети САО РАН, доступ к ним возможен с веб-страницы (кнопка Archive .csv Seeing, как видно на рис. 3).

По данным измерениям была сформирована таблица, были построены графики изменения seeing за каждую ночь, за каждый месяц отдельно, по временам года (осень 2023 г., зима 2023-2024 г., весна 2024 г.), а также график за весь период работы системы. Пример графиков за ночь показаны на рис. 5.

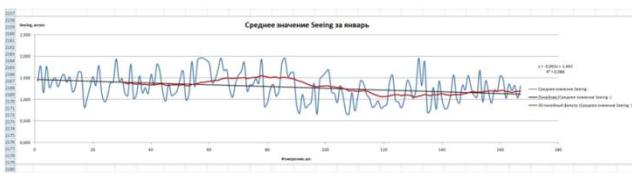


Рис. 4. График изменения seeing за январь 2024 г.

В графиках за месяц, по временам года и за все время были также построены линии фильтрации по среднему значению (фильтр за 30 значений), как оказалось, в среднем за полностью ясную ночь сохраняется 30 значений seeing) и линии тренда. Пример месячного графика (январь 2024 г.) представлен на рис. 4.

Наиболее интересными являются графики по временам года, показанные на рис. 5. На графиках видна тенденция снижения значения seeing, а значит улучшения качества атмосферы в зимний период времени, в то время как в осенний и весенний периоды тренд практически не менялся. Дальнейшие исследования позволят добавить также и летний период для полноты картины, и надеемся, в будущем также данные за годы измерений.

Также были сформированы графики сравнения полученных измерений seeing с измерениями на приборах наблюдения телескопа БТА, как показано на рис. 6.

Сравнения проводились с данными seeing из отчетов наблюдений на приборах Scorpio 1, Scorpio 2 и Nes за весенний период 2024 г., так как в этот период было получено большее количество измерений seeing за полную ночь, а значит, в этот период было большее количество ясных ночей.

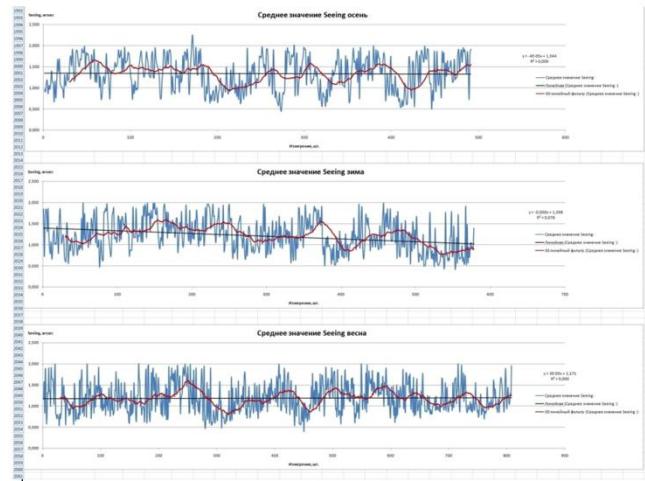


Рис. 5. График изменения seeing по временам года (осень 2023 г., зима 2023-2024 г., весна 2024 г.)

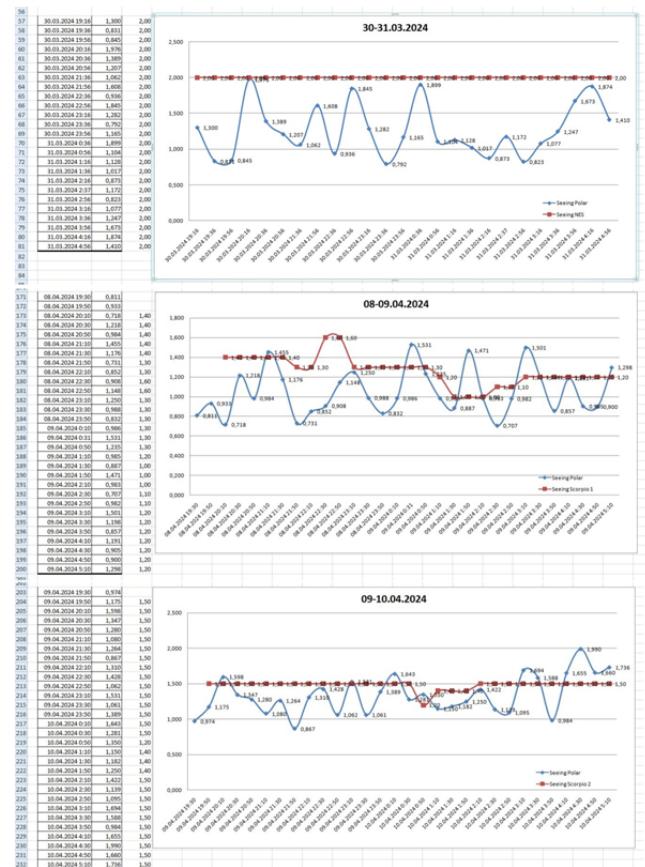


Рис. 6. Графики сравнения качества изображения “seeing” с измерениями в наблюдениях на БТА (приборы: Scorpio-1, Scorpio-2 и Nes)

Основываясь на [4], разница в измерениях seeing различных приборов в 1-1.5 угл.сек. является свидетельством погрешности по причине наблюдения различных объектов.

Полезным отличием нашей системы является непрерывность получаемых измерений, не зависящая от смены прибора согласно графика наблюдений, а также не зависящая от атмосферных явлений, не влияющих критично на прозрачность атмосферы.

Например, как показано на рис. 7, при прояснении неба и при запрете наблюдений по причине сильного ветра ($\approx 20\text{m/s}$), как в ночь 11-12 января 2024 г., наша система продолжает проводить измерения.

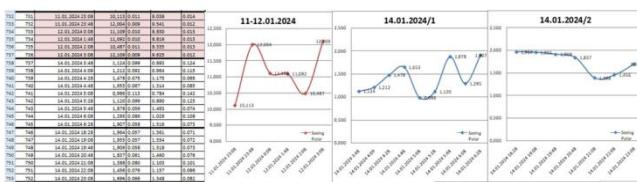


Рис. 7. Измерения seeing во время прояснений неба при сильном ветре ($\approx 20\text{m/s}$), в ночь 11-12 января 2024 г.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы и расчеты, описанные в данной статье, позволяют, используя изображения, полученные IP-камерой на базе CMOS матрицы, рассчитать значения астрономической видимости, обусловленной состоянием атмосферы (seeing) и радиус Фрида (r_0). На основе данных методов и расчетов нами была реализована и внедрена в эксплуатацию в САО РАН система мониторинга Полярной звезды, работающая круглосуточно с обновлением данных раз в 20 минут.

Первичные результаты, полученные данной системой, были проанализированы, произведено сравнение с измерениями, полученными другими приборами на ВНП САО РАН. Полезным отличием этой системы является непрерывность получаемых измерений, не зависящая от смены прибора согласно графика наблюдений, а также не зависящая от атмосферных явлений, не влияющих критично на прозрачность атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров В.В. Синтез телевизионных наблюдательных систем на примере телескопов БТА и Цейсс-1000 // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ V Всероссийской научной конференции. т.III, Пятигорск. – С. 72-77.
2. Комаров В.В., Шалдырван И.В. Модернизация систем ночного видения в обсерватории САО РАН // Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2024. – С. 430-431.
3. Tokovinin A. From Differential Image Motion to Seeing // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – Vol. 114. – P. 1156-1166.
4. Sarazin M., & Roddier F. The ESO Differential Image Motion Monitor // Astronomy and Astrophysics. – Vol. 227. – P. 294-300.
5. Шалдырван И.В., Комаров В.В., Фокин М.Ю. Методы и расчеты, применяемые к изображениям новых подсмотровых систем САО РАН // Известия Крымской Астрофизической Обсерватории. – Т. 119 (2). – С. 12-18.

Методы оценки координат и параметров движущихся объектов по пеленговой информации с подвижного носителя морского базирования

Первухин Дмитрий Анатольевич
Кафедра системного анализа и управления
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II
Санкт-Петербург, Россия
pervuchin@rambler.ru

Аннотация. Целью настоящего исследования является оценка и сравнительный анализ различных методов решения информационных задач по определению координат и параметров движущихся объектов по пеленговой информации, осуществляемого с подвижного носителя морского базирования. Для решения указанных задач при наличии ошибок наблюдений применяются различные методы фильтрации и разные математические модели. Рассмотренные методы дают различные, но сопоставимые между собой результаты, комплексирование которых позволяет повысить точность и достоверность решения информационных задач.

Abstract. The purpose of this study is to evaluate and compare various methods of solving information problems to determine the coordinates and parameters of moving objects using direction-finding information carried out from a mobile sea-based carrier. To solve these problems, in the presence of observation errors, various filtering methods and different mathematical models are used. The considered methods give different, but comparable results, the combination of which makes it possible to increase the accuracy and reliability of solving information problems.

Ключевые слова: информационно-управляющая система, движущийся объект, подвижный носитель, пеленговая информация, координаты и параметры движущегося объекта.

Keywords: *information and control system, moving object, mobile carrier, bearing information, coordinates and parameters of a moving object.*

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для решения некоторых информационных задач, осуществляемых информационно-управляющими системами (ИУС) подвижных носителей (ПН) морского базирования, используется накопленная за определенный промежуток времени информация о пеленге на движущийся объект (ДО), получаемая от гидроакустических средств ПН, при отсутствии данных о дистанции (дальности) до него. При этом к оперативности и точности решения задач предъявляются достаточно жесткие требования, что диктуется тактикой применения ПН в современных условиях [1, 2].

Основной проблемой при решения подобных задач является наличие ошибок наблюдаемых значений пеленга, оказывающих существенное влияние на результаты решения задачи. Целью решения информационной задачи по пеленговой информации является определение координат и параметров движущегося объекта (КПДО), за которым осуществляется наблюдение.

В современных ИУС ПН для определения КПДО при отсутствии данных о дистанции до объекта наблюдения реализуются различные методы, базирующиеся на использовании как текущей информации о пеленге и его изменении (методы подбора) [2, 3], так и выборки значений пеленга за определенный интервал наблюдения за ДО при гипотезе о прямолинейном равномерном его движении и расчета искомых параметров: курса, скорости и дистанции с последующей статистической обработкой избыточного числа их полученных значений (статистические методы: «N пеленгов», фильтрации Калмана и др.) [4, 5].

Методы подбора КПДО обладают приемлемой оперативностью расчета, однако значительный объем неформализуемых вычислительных операций, потенциальная возможность грубых промахов и невысокая точность вычислений допускает неоднозначность определения искомых параметров, что требует высокой квалификации оператора и необходимости практического опыта решения задач определения КПДО.

Статистические методы позволяют автоматизировать вычислительный процесс, однако получение приемлемых по точности и достоверности сходящихся решений при их использовании возможно лишь в ограниченных случаях при задании выверенных априорных исходных данных на достаточно длительном временном интервале наблюдения.

Таким образом, все вышеперечисленные методы имеют существенные недостатки, к которым следует добавить еще один: они работоспособны только при условии совершения маневра ПН (путем значительного изменения вектора скорости), что негативно влияет на его скрытность и резко снижает оперативность решения задачи определения КПДО.

II. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КПДО

Рассмотрим основные методы пеленгования, применяемые в настоящее время. Современные методы, основанные на использовании аналитических зависимостей (дальномерный, суммарно-дальномерный, разностно-дальномерный, углерный, углерно-дальномерный и др.), являются пространственно-позиционными, т.е. статическими по своей сущности [6].

Как правило, реализация существующих способов пеленгования требует двух и более стационарных источников информации, формирующих позиционные элементы в двух- или трехмерном пространстве (линии или части поверхностей положения: сфер, эллипсоидов, гиперболоидов вращения и др.), пересечения которых являются координатами наблюдаемого ДО, а под измерительной базой понимается расстояние между указанными источниками информации.

При наличии единственного стационарного источника информации и отсутствии дальномерного канала определение полных координат неподвижного или движущегося объекта, однозначно определяющего его положение в пространстве и времени, теоретически невозможно. Вместе с тем, некоторые координаты ДО объекта могут быть определены точно с использованием строгих аналитических зависимостей, например, направление вектора скорости объекта относительно источника информации, т.е. его курсовой угол.

Однако, при размещении углерного источника информации о ДО на ПН ситуация радикально меняется. Появляется принципиальная возможность пеленгования объекта (стационарного или движущегося) с различных направлений, разнесенных как в пространстве, так и во времени. При этом задача определения КПДО при отсутствии информации о дистанции до него по сути представляет собой задачу пеленгования движущегося в пространстве и времени объекта при гипотезе о заданном режиме его движения (для большинства применяемых в настоящее время методов – прямолинейного равномерного) с единственного подвижного носителя, т.е. определения таких параметров ДО: курса, скорости и дистанции до него, которые удовлетворяют наблюдаемым значениям пеленга Π_u и его изменения $\Delta\Pi_u$.

При этом, идеальное (при отсутствии ошибок) наблюдаемое значение пеленга будет представлять собой некоторую гладкую функцию времени $\Pi = \Pi(t)$. При заданном режиме движения объекта (например, в виде функциональной зависимости вектора скорости от времени $\bar{V}_u = \bar{V}_u(t)$), полной информации о параметрах движения носителя (координатах и векторе скорости ПН $\bar{V}_n = \bar{V}_n(t)$) очевидно, что существует однозначная аналитическая взаимосвязь между функционалом изменения пеленга F за период наблюдения и значениями КПДО (в дальнейшем для определенности под КПДО будем понимать скалярные величины: q_u – курсовой угол ДО; V_u – модуль вектора скорости ДО; D_u – дистанция до ДО), которые также изменяются на интервале наблюдения в соответствии с режимами движения наблюдаемого объекта и ПН:

$$\Pi(t) = F[q_u(t), V_u(t), D_u(t), \bar{V}_n(t), t].$$

Таким образом, определение аналитических взаимосвязей КПДО с наблюдаемыми значениями пеленга и параметрами собственного движения ПН, изменяющимися во времени:

$$q_u(t) = F_1[\Pi(t), V_u(t), D_u(t), \bar{V}_n(t), t];$$

$$V_u(t) = F_2[\Pi(t), q_u(t), D_u(t), \bar{V}_n(t), t];$$

$$D_u(t) = F_3[\Pi(t), q_u(t), V_u(t), \bar{V}_n(t), t],$$

дает возможность аналитического вычисления искомых параметров: q_u, V_u, D_u на интервале наблюдения, т.е. реализации динамических способов пеленгования при отсутствии дальномерного канала, которые по сути являются пространственно-позиционными.

Процесс наблюдения пеленга с использованием реальных измерительных устройств всегда сопровождается негативным влиянием на них помех стохастической природы. Поэтому измеренные значения пеленга $\Pi_u(t)$ кроме истинной составляющей $\Pi(t)$ содержат в себе инструментальные $\delta(t)$ и стохастические $\varepsilon(t)$ ошибки:

$$\Pi_u(t) = \Pi(t) + \delta(t) + \varepsilon(t).$$

Инструментальные ошибки $\delta(t)$ обычно компенсируются путем калибровки и учета поправок в процесс обработки измерительной информации. Рассмотрение способов компенсации инструментальных ошибок выходит за рамки настоящей работы.

Компенсация стохастических ошибок $\varepsilon(t)$ осуществляется путем решения задачи фильтрации или сглаживания, в результате которого наблюдаемый процесс $\Pi_u(t)$ заменяется моделью $\tilde{\Pi}(t)$, наиболее адекватно приближенной к истинному процессу $\Pi(t)$. Как правило, при стационарных статистических характеристиках стохастических ошибок ошибки аппроксимации (фильтрации) намного меньше, чем $\varepsilon(t)$:

$$\Delta\tilde{\Pi}(t) = \tilde{\Pi}(t) - \Pi(t) \langle \langle \varepsilon(t) \rangle \rangle,$$

поэтому при использовании в качестве исходных данных для расчета КПДО параметров модели $\tilde{\Pi}(t)$ возможно получение результатов, точность которых на порядок выше, чем точность измерений пеленга $\Pi_u(t)$.

В соответствии с вышеизложенным, задачу определения КПДО в реальных условиях целесообразно решать в 2 этапа по обобщенному алгоритму, представленному на рис. 1.

Рассмотрим II этап решения задачи определения КПДО при допущении о том, что исходные данные для аналитического вычисления КПДО соответствуют истинному процессу, т.е. задача фильтрации решена идеально: $\tilde{\Pi}(t) = \Pi(t)$.

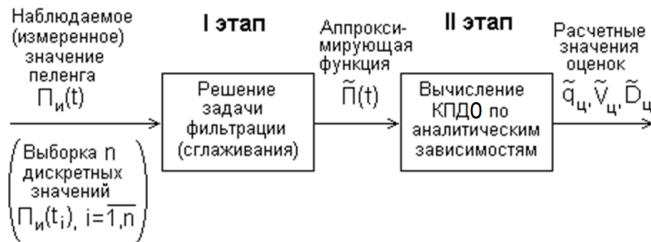


Рис. 1. Обобщенный алгоритм определения КПДО

Ниже представлены четыре способа определения КПДО, разработанных с применением вышеописанных подходов, различающихся содержанием используемых исходных данных и, соответственно, видом расчетных зависимостей. Представленные ниже расчетные выражения являются строгими, выведенными в рамках изложенных выше гипотез о движении наблюдаемого объекта и ПН. Первые три способа разработаны для стационарного движения ДО, т.е. ситуации, когда его движение является прямолинейным равномерным. При этом в пределах временного интервала наблюдения значения вектора скорости ДО принимаются постоянными:

$$\bar{V}_u(t) = \text{const}$$

или, при использовании скалярных величин:

$$V_u(t) = \text{const}; \quad \theta_{ui}(t) = \text{const},$$

где $V_u(t)$, $\theta_{ui}(t)$ – модуль и угол ориентации вектора скорости ДО относительно одной из осей инерциальной системы координат, соответственно.

Пусть на борту ПН на момент начала наблюдения t_0 сформирована плоская прямоугольная инерциальная система координат XOY , в которой рассматривается движение объекта и ПН, как показано на рис. 2.

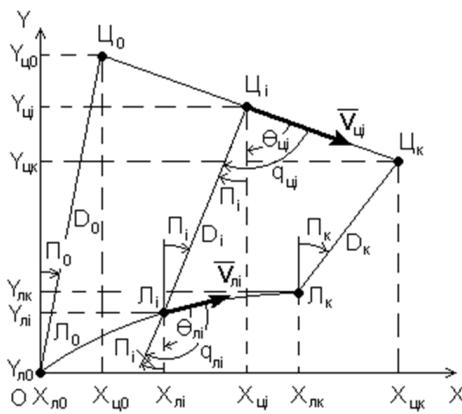


Рис. 2. Геометрическая взаимосвязь траекторий ДО и ПН

Зафиксируем начало системы координат (точку O) в точке L_0 траектории движения ПН, соответствующей начальным координатам (X_{lo}, Y_{lo}) в момент t_0 , а ось OY – таким образом, чтобы угол между ней и направлением на точку L_0 , соответствующую координатам ДО (X_{uo}, Y_{uo}) в момент t_0 соответствовали в общем случае произвольному значению Π_0 .

Введем понятие измерительной базы, под которой будем понимать временной интервал наблюдения. Обозначим нижнюю и верхнюю границы измерительной базы t_0 и t_k , в пределах которой введем в рассмотрение переменную t_i , $t_0 \leq t_i \leq t_k$.

Тогда при линейном изменении t_i в пределах измерительной базы от начального t_0 до конечного t_k значение поведение ДО будет описываться прямолинейной траекторией движения точки L_i от L_0 до L_k с постоянной скоростью, а ПН – в общем случае произвольной траекторией движения точки L_i от L_0 до L_k . В каждый момент времени t_i точки L_i и L_i имеют определенные значения векторов скорости \bar{V}_{ui} и \bar{V}_{li} , ориентированных относительно оси OY углами θ_{ui} и θ_{li} (по условию задачи $V_{ui} = \text{const}$; $\theta_{ui} = \text{const}$ и, в общем случае, $V_{li} \neq \text{const}$; $\theta_{li} \neq \text{const}$). За положительное направление всех углов принимается направление, соответствующее движению по часовой стрелке. Диапазону измерительной базы (t_0, t_k) соответствует функциональный диапазон изменения наблюдаемого значения пеленга $\Pi(t)$, как показано на рис. 3.

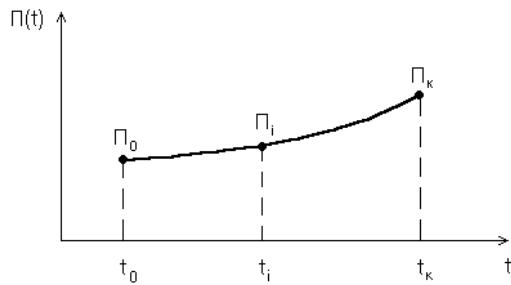


Рис. 3. Функция изменения пеленга

Функция $\Pi(t)$ в общем случае может иметь локальные экстремумы, то есть немонотонный характер изменения – при смене знака величины изменения пеленга (ВИП).

По условию задачи проекции вектора скорости движения ДО на оси OX и OY в пределах измерительной базы являются величинами постоянными:

$$\dot{X}_{ui} = V_{ui} \sin \theta_{ui} = \dot{X}_u = \text{const};$$

$$\dot{Y}_{ui} = V_{ui} \cos \theta_{ui} = \dot{Y}_u = \text{const}; \quad (1)$$

$$t_0 \leq t_i \leq t_k.$$

Информация о собственном движении ПН считается полной, т.е. текущие координаты и параметры ее движения в каждый момент t_i определяются бортовым навигационным комплексом с необходимой точностью, например, путем двойного интегрирования ускорений с датчиков (акселерометров), оси чувствительности которых ориентированы по координатным осям OX и OY :

$$X_{\text{ли}} = \iint_t \ddot{X}_{\text{ли}} dt dt = \int_{t_0}^{t_i} \dot{X}_{\text{ли}} dt;$$

$$Y_{\text{ли}} = \iint_t \ddot{Y}_{\text{ли}} dt dt = \int_{t_0}^{t_i} \dot{Y}_{\text{ли}} dt,$$

где $\dot{X}_{\text{ли}} = V_{\text{ли}} \sin \theta_{\text{ли}} \neq \text{const};$
 $\dot{Y}_{\text{ли}} = V_{\text{ли}} \cos \theta_{\text{ли}} \neq \text{const}.$

Курсовой угол ПН в соответствии с рис. 1 вычисляется по зависимости:

$$q_{\text{ли}} = \theta_{\text{ли}} + \Pi_i.$$

Методы решения задач определения КПДО по пеленговой информации с подвижного носителя, исключая ручные методы подбора, по используемым исходным данным можно условно разделить на четыре метода:

- метод «N-пеленгов»;
- метод определения КПДО с использованием первой и второй производных от пеленга;
- метод определения КПДО с использованием первой производной от пеленга;
- метод «N-полиномов».

Метод «N-пеленгов» достаточно широко освещен в различных источниках и применяется при наличии благоприятных условий для наблюдения за ДО, поэтому не рассматривается в настоящей работе [1–3].

A. Метод определения КПДО с использованием первой и второй производных от пеленга

Сущность метода изложена в работах [7–9].

В качестве исходных данных для расчета КПДО: $q_{\text{ли}}$, V_u , $D_{\text{ли}}$ используется информация:

- о движении объекта: значение Π_i , первая $\dot{\Pi}_i$ и вторая $\ddot{\Pi}_i$ производные функции $\Pi(t)$;
- о движении ПН: величина модуля вектора скорости $V_{\text{ли}}$ и курсового угла $q_{\text{ли}}$.

Для получения невырожденных решений необходимо соблюдение следующих условий:

- на измерительной базе необходимо выбрать не менее 2-х точек:

$$i = \overline{1, n}, \quad n \geq 2; \quad (2)$$

- значения вектора скорости ПН в выбранных точках должны отличаться друг от друга, т.е. в масштабе измерительной базы ее движение должно быть отличным от прямолинейного равномерного:

$$V_{\text{ли}} \neq \text{const} \text{ и/или } \theta_{\text{ли}} \neq \text{const}. \quad (3)$$

Условие (3) может выполняться при различных вариантах плавного и скачкообразного изменения режима движения ПН: при циркуляции, смене галсов, плавном или резком изменении скорости движения и др.

Для решения задачи используется система n линейных алгебраических уравнений с 2-мя неизвестными. Введение избыточности позволяет осуществлять статистическое сглаживание результатов, получаемых по совокупности используемых точек, распределенных по измерительной базе, с целью минимизации ошибок расчета КПДО, обусловленных погрешностями аппроксимирующей функции $\tilde{\Pi}(t)$. Число уравнений определяется количеством выбранных точек:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} z_j = b_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где

$$a_{i1} = \ddot{\Pi}_i \cos \Pi_i + 2(\dot{\Pi}_i)^2 \sin \Pi_i, \quad i = \overline{1, n};$$

$$a_{i2} = \ddot{\Pi}_i \sin \Pi_i - 2(\dot{\Pi}_i)^2 \cos \Pi_i, \quad i = \overline{1, n};$$

$$b_i = f_1(V_{\text{ли}}, q_{\text{ли}}, \Pi_i, \dot{\Pi}_i, \ddot{\Pi}_i), \quad i = \overline{1, n}$$

при условии $t_1 \neq t_2 \neq \dots \neq t_n$.

Система двух уравнений (при $n = 2$, т.е. 2-х выбранных точках) решается относительно z_j , $j = \overline{1, 2}$ стандартным способом:

$$z_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{b_1 a_{22} - b_2 a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{21} a_{12}}, \quad (5)$$

$$z_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{a_{11} b_2 - a_{21} b_1}{a_{11} a_{22} - a_{21} a_{12}}.$$

Решение избыточной системы из $n \geq 3$ уравнений осуществляется с использованием метода наименьших квадратов (МНК) путем сведения ее к системе 2-х нормальных уравнений с 2-я неизвестными по методу Гаусса:

$$\sum_{i=1}^n a_{ip} \sum_{j=1}^2 a_{ij} \tilde{z}_j = \sum_{i=1}^n a_{ip} b_i, \quad p = \overline{1, 2}, \quad (6)$$

где \tilde{z}_j – оценочные значения неизвестных z_1 и z_2 , дающие минимум суммы квадратов невязок системы уравнений (4). Система уравнений (6) решается относительно неизвестных \tilde{z}_j , $j = \overline{1, 2}$ также с использованием стандартной процедуры вида (5).

Полученные значения неизвестных z_j , $j = \overline{1, 2}$ представляют собой проекции вектора скорости движения ДО на оси OX и OY прямоугольной инерциальной системы координат XOY :

$$z_1 = \dot{X}_u;$$

$$z_2 = \dot{Y}_u,$$

которые определяются выражениями (1).

Значение курсового угла ДО (см. рис. 1) для выбранной в пределах измерительной базы точки рассчитывается по зависимости:

$$q_{ui} = \theta_u + \Pi_i, \quad (7)$$

где

$$\theta_u = \arctg\left(\frac{z_1}{z_2}\right). \quad (8)$$

Модуль вектора скорости ДО вычисляется по формуле:

$$V_u = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}. \quad (9)$$

Дистанция до объекта для выбранной точки измерительной базы определяется по выражению:

$$D_{ui} = \frac{V_u \sin q_{ui} - V_{li} \sin q_{li}}{\dot{\Pi}_i}. \quad (10)$$

B. Метод определения КПДО с использованием первой производной от пеленга

Сущность метода изложена в работах [7–9].

Исходными данными для определения искомых параметров: q_{ui} , V_u , D_{ui} является аналогичная информация, которая используется в I способе, отличающаяся отсутствием второй производной $\ddot{\Pi}_i$ функции $\Pi(t)$, наличием значений t_i и координат ПН X_{li} и Y_{li} . Условиями получения однозначных невырожденных решений являются:

- выбор на измерительной базе не менее 2-х пар точек:

$$i = \overline{1, n}, \quad n \geq 2l, \quad l = \overline{1, 2}; \quad (11)$$

- движение ПН в пределах участка траектории, на котором выбрана пара точек, должно быть прямолинейным равномерным:

$$V_{li}(l) \neq \text{const} \text{ и } \theta_{li}(l) \neq \text{const}; \quad (12)$$

- значения вектора скорости ПН по различным участкам траектории, на которых выбираются пары точек, должны отличаться друг от друга, т.е. в масштабе всей измерительной базы движение ПН не должно быть прямолинейным равномерным:

$$V_{li}(i) \neq \text{const} \text{ и/или } \theta_{li}(i) \neq \text{const}. \quad (13)$$

Для выполнения условий (12) и (13) движение ПН на участках наблюдения пеленга должно быть прямолинейным равномерным. На остальных участках изменение режима движения ПН может осуществляться аналогично описанному в I способе.

Как и в I способе, для решения задачи используется система n линейных алгебраических уравнений с 2-я неизвестными. Число уравнений определяется количеством выбранных пар точек:

$$\sum_{j=1}^2 c_{ij} z_j = d_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где

$$\begin{aligned} c_{i1} &= \dot{\Pi}_i^{(2)}(t_i^{(2)} - t_i^{(1)}) \cos \Pi_i^{(1)} - \\ &\quad - \sin(\Pi_i^{(2)} - \Pi_i^{(1)}) \cos \Pi_i^{(2)}; \\ c_{i2} &= \dot{\Pi}_i^{(2)}(t_i^{(2)} - t_i^{(1)}) \sin \Pi_i^{(1)} - \\ &\quad - \sin(\Pi_i^{(2)} - \Pi_i^{(1)}) \sin \Pi_i^{(2)}; \\ d_i &= f_2(V_{li}, q_{li}^{(2)}, X_{li}^{(1)}, X_{li}^{(2)}, Y_{li}^{(1)}, \\ &\quad Y_{li}^{(2)}, \Pi_i^{(1)}, \Pi_i^{(2)} \dot{\Pi}_i^{(2)}); \\ i &= \overline{1, n}. \end{aligned}$$

при условии $t_1^{(1)} \neq t_1^{(2)} \neq t_2^{(1)} \neq t_2^{(2)} \neq \dots \neq t_n^{(1)} \neq t_n^{(2)}$.

Верхний индекс в круглых скобках используемых параметров означает номер выбранной из пары точки на i -м участке.

Методы решения системы 2-х уравнений (при $n=2$) и избыточной системы уравнений (при $n \geq 3$) аналогичны приведенным в I способе. После получения значений неизвестных z_j , $j = \overline{1, 2}$ искомые параметры q_{ui} , V_u , D_{ui} определяются по зависимостям (7)...(10).

Проведем анализ реальных значений исходных данных, необходимых для решения задачи, и сформулируем основные требования к условиям и способам получения информации об изменении пеленга на ДО и режиму движения ПН в процессе его наблюдения.

Оценка возможных величин параметров $\dot{\Pi}_i$ и $\ddot{\Pi}_i$, входящих в качестве исходных данных в расчетные зависимости I и II способа, в типовых ситуациях показывает, что при скоростях ДО порядка 10...15 м/с, ПН – 3...5 м/с на дальностях 10...20 км, их численные значения будут измеряться десятитысячными, стотысячными и даже миллионными долями рад/с и рад/с², соответственно.

При операциях над такими числами с заданной степенью точности результатов требуется существенное увеличение разрядности вычислительных средств, поэтому с целью рационального использования этих ресурсов в процессе решения задачи представляется целесообразным переход от реального времени (исчисляемого в секундах) к приведенному или масштабному (которое измеряется сотнями, тысячами или десятками тысяч секунд), обеспечивающему возрастание численных значений параметров $\dot{\Pi}_i$ и $\ddot{\Pi}_i$ на несколько порядков. Позиционный принцип решения задачи определения КПДО, как решение задачи пеленгования, позволяет сделать это.

При известной функции $\Pi(t)$ оценки $\dot{\hat{P}}_i$ и $\ddot{\hat{P}}_i$ могут быть получены путем дифференцирования функции $\Pi(t)$ и расчета численных значений функций $\dot{\hat{P}}_i$ и $\ddot{\hat{P}}_i$ в точке t_i или по первым разностям функций $\Pi(t)$ и $\dot{\hat{P}}_i$ в окрестностях выбранной точки t_i .

В зависимости от применяемого способа определения КПДО параметры движения ПН в процессе получения и накопления информации о пеленге ДО должны удовлетворять условиям (2), (3) и/или (11)...(13). Например, для решения задачи одновременно двумя способами достаточно того, чтобы при прямолинейном равномерном движении в пределах заданной измерительной базы ПН совершил хотя бы один незначительный маневр модулем и/или направлением вектора скорости. При этом траектория движения ПН в системе координат XOY будет состоять из 2-х участков прямолинейного равномерного движения. Тогда задача определения искомых параметров q_{ui} , V_u , D_{ui} может быть решена по 2-ум точкам и 2-ум парам точек I и II способами, соответственно.

C. Метод «N-полиномов»

Метод «N-полиномов» представляет собой метод построения оценки траектории ДО по пеленговой информации с подвижного наблюдателя, оптимизированный по точности выработки статистических оценок координат и параметров движения объекта наблюдения в двухмерном пространстве [10, 11].

В основе метода лежит аппроксимация параметрически заданной функции координат ДО от времени линейной комбинацией ортогональных полиномов Чебышёва, образующей полиномиальный ряд степени N. При этом линеаризация решения осуществляется за счет линейной оптимизации коэффициентов аппроксимирующего полинома по данным дискретных наблюдений.

Для нахождения функции траектории движения объекта строятся аппроксимирующие функции координат от времени наблюдения $x^{tgt} = [r_x^{tgt}(t), r_y^{tgt}(t)]$, которые выражаются посредством линейной комбинации ортогональных многочленов Чебышева:

$$\begin{aligned} r_x^{tgt}(\tau) &= a_0 T_0(\tau) + a_1 T_1(\tau) + \dots + a_n T_n(\tau); \\ r_y^{tgt}(\tau) &= b_0 T_0(\tau) + b_1 T_1(\tau) + \dots + b_n T_n(\tau). \end{aligned} \quad (14)$$

Связь между данными наблюдения и состоянием наблюдаемого объекта показана на рис. 4 и устанавливается посредством задания уравнения наблюдения:

$$(r_y^{tgt})_i - (r_y^{obs})_i = k_i [(r_x^{tgt})_i - (r_x^{obs})_i], \quad (15)$$

где

$$k_i = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - P_i\right) = \operatorname{ctg}(P_i);$$

P_i – угол пеленга на объект наблюдения для i -го наблюдения.

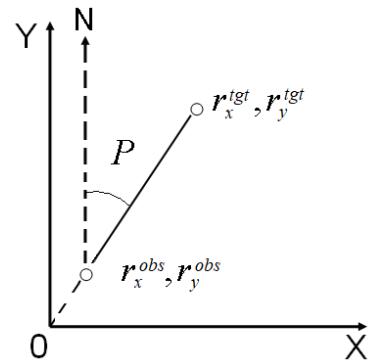


Рис. 4. Взаимосвязь между ПН и ДО, r_x^{obs}, r_y^{obs} – координаты наблюдателя, r_x^{tgt}, r_y^{tgt} – координаты объекта, P_i – угол пеленга

В целях минимизации влияния вычислительной ошибки для функции $\operatorname{ctg}(P_i)$ для каждого уравнения наблюдения осуществляется тождественное преобразование координат, поворачивающее базовую систему координат на угол $\alpha_i = \pi/2 - P_i$ таким образом, чтобы значения угла пеленга в новой системе координат были близки к 0° .

Выполнив тождественные тригонометрические преобразования, введя обозначение $B_i = \sin(P_i)$ и $C_i = \cos(P_i)$, систему уравнений (15) можно записать в виде:

$$B_i(r_y^{tgt})_i - C_i(r_x^{tgt})_i = B_i(r_y^{obs})_i - C_i(r_x^{obs})_i. \quad (16)$$

Подставив в (16) аппроксимирующие функции (14) для каждого из произведенных наблюдений, а затем преобразовав полученную систему к матричному виду, получим матричное уравнение:

$$AX = F, \quad (17)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} B_1 T_0(\tau_1) \dots B_1 T_m(\tau_1) - C_1 T_0(\tau_1) \dots - C_1 T_m(\tau_1) \\ \dots \\ B_n T_0(\tau_n) \dots B_n T_m(\tau_n) - C_n T_0(\tau_n) \dots - C_n T_m(\tau_n) \end{pmatrix};$$

$$X = (b_1 \dots b_m, \dots a_1 \dots a_m);$$

$$A = \begin{pmatrix} B_1 r_y^{trg}(\tau_1) - C_1 r_x^{trg}(\tau_1) \\ \dots \\ B_n r_y^{trg}(\tau_n) - C_n r_x^{trg}(\tau_n) \end{pmatrix}.$$

Здесь матрица A представляет собой матрицу наблюдений, а вектор-столбец F содержит координаты наблюдателя, m – степень аппроксимирующего полинома, n – количество произведенных наблюдений, а τ_i – приведенное время наблюдений, определенное как:

$$\tau_i = \frac{2t_i - t_1 - t_n}{t_n - t_1},$$

где t_i – время i -го наблюдения, t_1 – время 1-го наблюдения, t_n – время n -го наблюдения.

На практике количество наблюдений значительно превышает число определяемых коэффициентов, а система (17) оказывается несовместной. Это приводит к необходимости искать псевдorешение системы:

$$A^T A \tilde{X} = A^T F, \quad (18)$$

Решив систему (18) относительно \tilde{X} , найдем коэффициенты аппроксимирующих полиномов $b_1 \dots b_m$, $a_1 \dots a_m$.

Подставив найденные коэффициенты в (14), получим искомые функции, аппроксимирующие траекторию движения объекта наблюдения.

Параметры ДО определяют посредством анализа функций, аппроксимирующих траекторию его движения.

Дистанция от наблюдателя до объекта наблюдения в момент времени t_k определяется через относительные координаты положения объекта наблюдения:

$$\begin{aligned} D_{ui} &= D_u(t_i) = \\ &= \sqrt{[(r_y^{tgt})_i - (r_y^{obs})_i]^2 + [(r_x^{tgt})_i - (r_x^{obs})_i]^2} = \\ &= \sqrt{(r_y)_i^2 + (r_x)_i^2}. \end{aligned}$$

Полагая, что

$$\begin{cases} V_x^{tgt}(t) = r_x^{tgt}(t) \frac{d}{dt}; \\ V_y^{tgt}(t) = r_y^{tgt}(t) \frac{d}{dt}, \end{cases}$$

значение скорости объекта наблюдения определяется в виде:

$$V_u = \sqrt{(V_x^{tgt})^2 + (V_y^{tgt})^2}.$$

Курс движения объекта наблюдения определяется по формуле (7) с использованием зависимости:

$$\theta_u = \arctg \left(\frac{V_x^{tgt}}{V_y^{tgt}} \right).$$

Ускорение объекта наблюдения определяется как:

$$\begin{cases} a_x^{tgt}(t) = r_x^{tgt}(t) \frac{d^2}{dt^2}; \\ a_y^{tgt}(t) = r_y^{tgt}(t) \frac{d^2}{dt^2}. \end{cases}$$

Метод позволяет проводить статистическую оптимизацию коэффициентов аппроксимирующего полинома за

счет оптимизации по методу наименьших квадратов поступающих от наблюдателя данных о пеленгах на объект наблюдения, что способствует повышению точности определения параметров движения объекта наблюдения на зашумленных данных.

Разработанный метод не требует задания предварительной оценки искомых параметров, и может быть использован как в качестве самостоятельного метода, так и в качестве метода первого шага в двухшаговых методах решения задачи определения КПДО для нелинейно движущегося объекта наблюдения.

Сравнительная оценка представленных выше методов показала следующее. Методы «N-пеленгов», а также определения КПДО с использованием производных от пеленга позволяют получать примерно одинаковые по точности результаты. Все они имеют один существенный недостаток – невозможность решения задачи при маневрировании ДО.

Метод «N-полиномов» лишен этого недостатка и это главное его достоинство. Он позволяет проводить статистическую оптимизацию коэффициентов аппроксимирующего полинома за счёт оптимизации по методу наименьших квадратов системы линейных уравнений, описывающих взаимосвязь координат ПН, ДО и поступающих данных о пеленге на объект наблюдения, вне зависимости от значений скорости и ускорения ПН и ДО.

Это позволяет обеспечить непрерывность решения задачи определения КПДО в момент осуществления ПН и(или) ДО маневра, что способствует сокращению совокупного времени решения задачи по сравнению со временем решения задачи методом «N-пеленгов».

Метод «N-полиномов» позволяет решать задачу на любых курсовых углах ДО, т.к. предусматривает минимизацию ошибок счисления за счёт преобразования координат путем их поворота, что существенно расширяет диапазон практического применения метода.

Изменение степени аппроксимирующего полинома, применяемого в методе «N-полиномов», позволяет получить для каждого набора входных данных конечное множество траекторий, представляющих движение объекта наблюдения, которые обладают хорошо сопоставимыми характеристиками. Указанные характеристики могут быть получены путем применения стандартных методов математического анализа к исследуемым полиномиальным моделям. Это позволяет сформулировать критерии определения степени адекватности представления реальной траектории движения объекта наблюдения моделью заданного порядка.

ЛИТЕРАТУРА

- Хвойц В.А. Тактика подводных лодок. – М.: Воениздат, 1989. – 264 с.
- Усанов А.А., Данилин В.Т., Епонешников Е.В. и др. Основы тактического маневрирования. Учебное пособие. – Л.: ВВМУПП, 1978. – 269 с.
- Проничкин А.П., Чуприков М.К., Скворцов М.И. и др. Справочник вахтенного офицера. – М.: Воениздат, 1975. – 458 с.
- Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Советское радио, 1978. – 384 с.
- Эльясберг П.Е. Определение движения по результатам измерений. – М.: Наука, 1976. – 416 с.

6. Брандин В.Н., Васильев А.А., Куницкий А.А. Экспериментальная баллистика космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1984. – 262 с.
7. Первухин Д.А., Андреев А.Б. Аналитические способы определения координат и параметров движения целей // Научно-технический сборник ФГУП «НПО «Аврора» «Системы управления и обработки информации». Вып. 6. – СПб.: ФГУП «НПО «Аврора», 2003. – С. 31-48.
8. Первухин Д.А. Аналитические подходы к определению координат и параметров движения целей // Сборник научных трудов. Посвящено 75-летию Северо-Западного государственного заочного технического университета. – СПб.: СЗТУ, 2005. – С. 144-157.
9. Первухин Д.А., Елхин А.А. Применение аналитических подходов для расчета координат и параметров движения морских целей // Сборник рефератов депонированных рукописей, сер. Б. – Вып. 77, инв. В6390. – М.: ЦВНИ МО РФ, 2006. – 14 с.
10. Первухин Д.А., Пюнниен С.А., Дымент А.Б. Применение метода N-полиномов для обеспечения повышения качества информации об обстановке для систем поддержки принятия решения командиром ПЛ // Морская радиоэлектроника. – СПб., 2016. – Вып. 4 (58). – С. 30-31.
11. Первухин Д.А., Пюнниен С.А. Обнаружение маневра цели методом N-полиномов // Научно-технический сборник «Системы управления и обработки информации». – Вып. 4 (35). – СПб.: АО «Концерн «НПО «Аврора», 2016. – С. 22-27.

Сравнительный анализ систем ночного и дневного видения в САО РАН

Комаров Владимир Владимирович
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
komarov@sao.ru

Шалдырван Игорь Викторович
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
blackflamberg6@yandex.ru

Фокин Максим Юрьевич
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
maksimfokin01@gmail.com

Аннотация. В данной работе проводится сравнительный анализ различных поколений подсмотровых систем, созданных в обсерватории САО РАН для наблюдательных комплексов и мониторинга небесной полусфера в районе оптических телескопов. Последние разработки на основе КМОП датчиков изображений позволили нам конструировать унифицированные компактные системы ночного и дневного видения для наблюдательных задач самого разного класса.

Abstract. In this paper, a comparative analysis of various generations of night and day systems created at the observatory of the SAO RAS for observation complexes and monitoring of the celestial hemisphere near of optical telescopes is carried out. Recent developments based on CMOS image sensors have allowed us to design unified compact night and day vision systems for tasks of a wide variety of classes.

Ключевые слова: ПЗС КМОП системы дневного и ночного видения.

Key words: CCD CMOS day and night systems.

I. ВВЕДЕНИЕ

Системы ночного видения в Специальной Астрофизической Обсерватории САО РАН являются необходимой частью наблюдательного процесса в астрофизических исследованиях. В спектрофотометрических комплексах конструируются подсмотровые системы для визуального контроля за исследуемым объектом. В процессе наведения, сопровождения наблюдаемого источника, а также коррекции ведения телескопа ведется постоянный мониторинг изображений подсмотровых камер. Кроме того, необходим постоянный контроль погодной обстановки в районе телескопов, мониторинг небесной полусфера, облачности, осадков и других важных метео-параметров.

В САО РАН разрабатываются подсмотровые системы для наблюдательной аппаратуры фотометрических и спектрополяриметрических комплексов, а также вспомогательные подсмотры для мониторинга ночных и дневного видения как небесной обстановки, окрестностей возле телескопов, так и мониторинг подкупольного пространства телескопов. За более чем двадцать лет, создано и внедрено в эксплуатацию множество подсмотровых систем различных поколений фотоприёмных устройств [1–3]. Начинали с видиконных SIT телевизионных камер с усилителем яркости на входе (ISIT) для получения предельной чувствительности. Затем перешли на более со-

временные приборы с зарядовой связью ПЗС\CCD камеры. Все телевизионные камеры подсмотров создавались на основе не сильно дорогих фотоприемников массового производства, т.к. в отличие от единичной астрономической наблюдательной фотоприемной аппаратуры, имеющей очень высокую стоимость, нам необходимо создавать десятки комплектов подсмотровых систем. Взятые за основу высокочувствительные CCD фотоприемники VNI-743 и VNI-748 позволили получить требуемое качество изображений для подсмотровых систем, как в фокусах телескопов, так и для мониторинга ночного неба. Но оборудование устаревает и его необходимо заменять. В последнее время производство фотоприемников нового типа КМОП/CMOS стало самым массовым в мире. По своим характеристикам CMOS сенсоры стали приближаться к CCD, а по некоторым параметрам даже превосходить их. При этом ценовой диапазон новых качественных высокочувствительных чипов CMOS на порядок ниже, что привлекло наше внимание для конструирования новых и замены старых систем ночных и дневного видения в нашей обсерватории.

II. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ SIT/ISIT И CCD/ICCD ПОДСМОТРОВЫХ СИСТЕМ САО РАН

В начале 2000-х годов в САО РАН был создан один из первых в обсерваториях мира цифровой телевизионный комплекс [4], который позволял в режиме реального времени получать оцифрованную видеинформацию как основную об источнике наблюдения и окрестностях наблюдаемого поля, так и вспомогательную: видеоконтроль положения телескопа и контроль облачности и прозрачности неба над БТА. Впервые в России была создана открытая в Интернет телевизионная система визуального контроля крупнейшего российского телескопа. Комплекс включал более двух десятков высокочувствительных систем – подсмотров для обеспечения наблюдений на оптических телескопах САО РАН.

A. SIT подсмотры

SIT (Silicon Intensified Target) – телевизионные камеры, использующие передающие трубки с мишенью в виде кремниевой диодной матрицы и с электростатической секцией переноса. В телекамерах БТА в качестве SIT-устройств применялись суперкремнины ЛИ-702 с внутренним усилением в мишени, с электростатической фокусировкой в секции переноса электронного изображения и магнитной фокусировкой и отклонением луча в секции считывания.

B. ISIT подсмотры

ISIT (I+SIT, I – Intensifier, ЭОП – электронно-оптический преобразователь, состыкованный с SIT-телекамерой). ЭОП является усилителем яркости изображения, обеспечивает преобразование первичных фотоэлектронов в фотонные вспышки до амплитуд, достаточных для их уверенного обнаружения супервидиконом, что увеличивает чувствительность сочененного прибора практически в 1000 раз.

C. CCD подсмотры

CCD/ПЗС (Charge-Coupled Device, ПЗС – прибор с зарядовой связью) – многоканальные твердотельные приемники. В телевизионной технике ПЗС вытеснили видиконы для уровней освещенности выше 10-3лк. Их высокая чувствительность, геометрическая стабильность телевизионного раstra, отсутствие эффекта выжигания, отсутствие микрофонного эффекта, нечувствительность к магнитным полям, малые габариты и энергопотребление, возможность накапливать сигнал и, что не маловажно, быстрое падение цен на ПЗС формата до 1/2", позволяют строить недорогие, но качественные видеоканалы для астрономических систем отождествления и гидирования звезд [5].

D. ICCD подсмотры

ICCD/(ЭОП + ПЗС) – Intensified Charge Coupled Device – прибор с зарядовой связью, состыкованный с ЭОП для увеличения чувствительности сочененного камеры почти на три порядка. Данные приборы, обладающие более высокой чувствительностью и малыми габаритами CCD камеры, продолжали оставаться громоздкими из-за ЭОП-ов.

В табл. 1 представлены первые подсмотровые системы на базе телевизионных камер.

ТАБЛИЦА 1. ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ПОДСМОТРЫ БТА И ЦЕЙСС-1000

N	Название	Конфигурация камеры	Место установки
1	Полевой подсмотр H1	ICCD	Фокус H1
2	Щелевой подсмотр H1	ISIT/ICCD	Фокус H1
3	Полевой подсмотр H2	ICCD	Фокус H2
4	Щелевой подсмотр H2	ISIT/CCD	Фокус H2
5	Полевой подсмотр СПФ	ISIT	Фокус СПФ
6	Щелевой подсмотр СПФ	ICCD	Фокус СПФ
7	Телегид 70	I-ICCD/CCD	Балкон H1
8	Контрольная СПФ	CCD	Фокус СПФ
9	Подкупольная БТА	CCD	Балкон БТА
10	Щелевой подсмотр UAGS	ICCD/CCD	Фокус 1 Цейсс
11	Щелевой подсмотр куде	ICCD/CCD	Фокус 2 Цейсс
12	Обзор неба 180	CCD	Окрестности БТА
13	Обзор неба 140	CCD	Окрестности БТА
14	Панорамный обзор	SIT/CCD	Окрестности БТА

В табл. 2 представлены основные параметры подсмотровых систем БТА на базе телевизионных камер.

ТАБЛИЦА 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОДСМОТРОВ БТА

N	Фокус	Тип приборов	Размер поля	m
1	H1 щель	ЭОП «Вяз» + видикон ЛИ-702	3 угл.мин.	19
2	H1 поле	ЭОП «ЭП-10» + ПЗС VNI-743	39 угл.мин.	17
3	H2 поле	ЭОП «Вяз» + видикон ЛИ-702	40 угл.сек.	12
4	H2 щель	ЭОП «ЭП-10» + видикон ЛИ-702	3,5 угл.мин	15
5	СПФ УАГС	ЭОП «МКМ2» + ПЗС VNI-743	4 угл мин.	20.
6	СПФ тест	ПЗС VNI-748	(32x26) угл.сек	9,8

^a m – предельная видимая звездная величина, полученная при изображениях лучше 2 угл.сек. (1 кадр, 40 мсек.)

Пример первого разработанного в САО РАН панорамного обзора неба в окрестности БТА приведён ниже. На рис. 1 показано изображение ночного неба SIT- панорамного обзора ВНП БТА (с видом на Цейсс-1000).

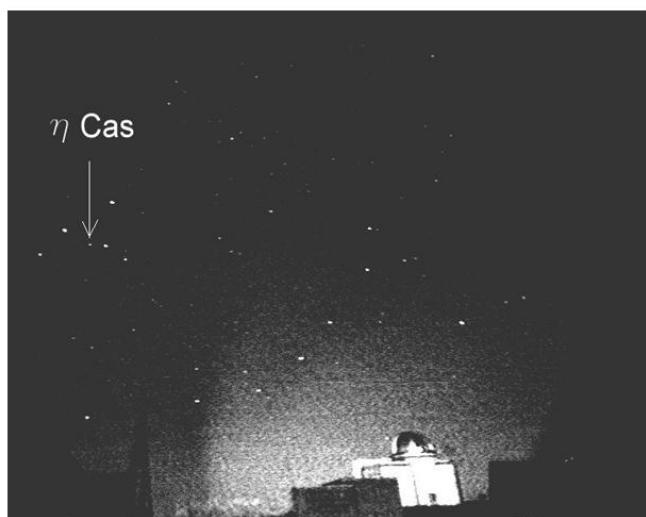


Рис. 1. SIT-подсмотр. Пример одного из предельно обнаруживаемых объектов – ηCas (3.4 звездная величина)

Ниже приведены примеры наблюдений с помощью ISIT и ICCD подсмотров в фокусах БТА. Показаны изображения подсмотров для полей фотометрических стандартов в рассеянном звездном скоплении NGC-7790. Удобство наблюдения данной площадки определялось тем, что оно располагается в северной части звездного неба (в созвездии Кассиопеи), что позволяет проводить исследования NGC 7790 в любое время года. И кроме того, поле в его окрестности имеет более 100 профотометрированных звезд от 13 до 19 зв.вел. в фильтре V в 6 минутной угловой области.

На рис. 2 показано исследование поля стандартов в окрестности NGC 7790, проводившееся в первичном фокусе:

- на верхнем рисунке оцифрован 1 кадр (время считываия кадра 40 мсек) – пример обычного наблюдения на ВКУ;
- в середине – изображение с накоплением сигнала (суммирование 10 кадров);
- внизу – изображение с накоплением сигнала (суммирование 50 кадров).

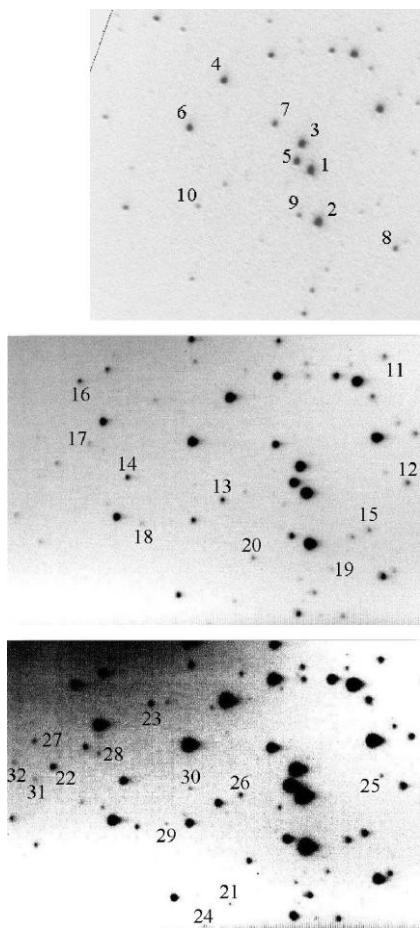


Рис. 2. ISIT подсмотр поля в СПФ. Отождествление объектов в окрестности NGC7790 при различном накоплении кадров

На рис. 3 показано изображение поля стандартов в окрестности NGC 7790, полученное в фокусе H1.

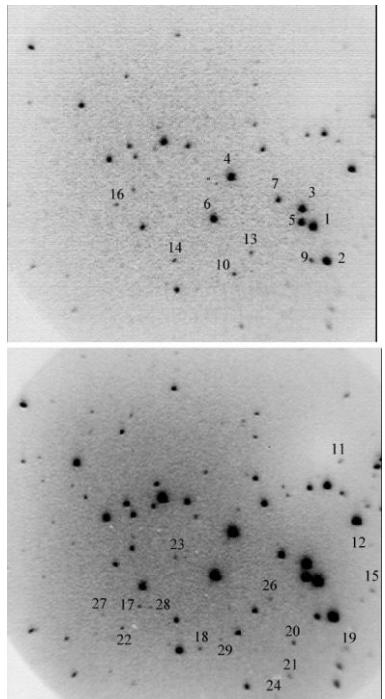


Рис. 3. ICCD подсмотр поля H1. Отождествление наблюдаемых объектов в окрестности NGC7790

Изображения получены при помощи оцифровки телевизионных кадров ICCD камеры телеподсмотра поля H1. Видно, что отождествление объектов поля по верхнему рисунку ограничено приблизительно 16-ой звездной величиной (см. табл. 3).

При накоплении до 10 кадров (нижний) можно уверенно отождествляться до 17m. При накоплении до 30 кадров – уверенное отождествление до 18,5m.

На рис. 4 показаны изображения, полученные при помощи оцифровки телевизионных кадров I-SIT камеры телеподсмотра щели H1:

- на левом верхнем рисунке оцифрован 1 кадр (40 мсек) – пример обычного наблюдения на ВКУ;
- справа – изображение с накоплением сигнала (суммирование 10 кадров);
- внизу – изображение с накоплением сигнала (суммирование 30 кадров).

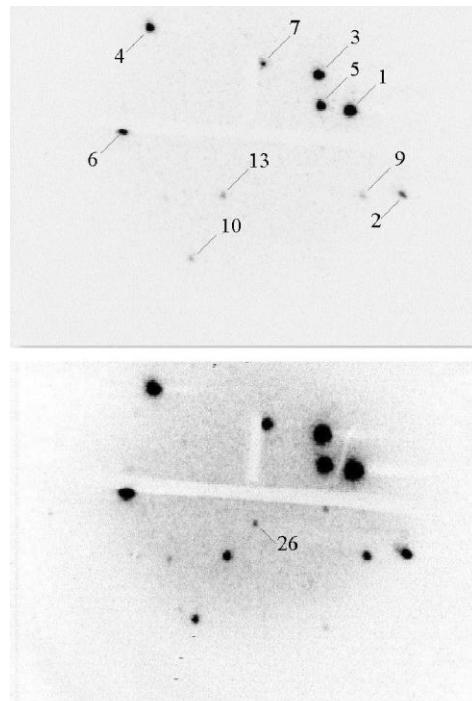


Рис. 4. ISIT подсмотр щели H1. Выведение объектов в исследуемом поле на щель спектрографа в H1 при различном суммировании изображения телеподсмотра щели

III. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ CCD И CMOS МАТРИЦ ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА НОЧНОГО И ДНЕВНОГО ВИДЕНИЯ

Ранее было проведено сравнение чувствительности научных камер Andor с CCD и CMOS датчиками [6]. Пример сравнения таких матриц показан на рис. 5.

На диаграмме разрешения при низком светодиодном освещении: sCMOS матрица (шум считывания 1.3 e- при скорости считывания 560 МГц) и межстрочная CCD матрица (шум считывания 5 e- при скорости считывания 20 МГц).

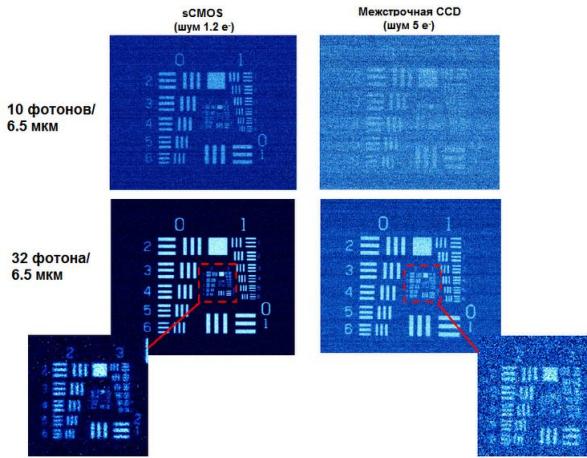


Рис. 5. Сравнение чувствительности CCD и CMOS детекторов на примере научных камер, выпускаемых фирмой Andor

В последнее время модернизация подсмотровых мониторинговых систем в обсерватории САО РАН проходит на основе CMOS-фотоприемников на базе матриц IMX335 фирмы Sony, а в дальнейшем мы стали использовать чипы IMX291. Данные приборы являются высокочувствительными и способны конкурировать с CCD фотоприемниками.

Технические характеристики данных матриц приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

ТАБЛИЦА 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ CMOS-ДАТЧИКА SONY IMX335

Название	Параметр
Физический размер:	Диагональ 6,52 мм (тип 1 / 2,8)
Формат:	4: 3
Цветовой фильтр:	RGB
Технология:	Back-illuminated, ГСП
Количество эффективных пикселей:	2616 (B) x 1964 (V) Прибл. 5.14MP
Размер пикселя:	(H) x (V) 2.0um x 2.0um
G чувствительность (тип.):	500mV
Сигнал насыщения датчика (мин.):	> 880 мВ (цель)
Максимальная частота кадров (режим прогрессивной развертки):	10 бит: 60 кадров / сек, 12 бит: 30 кадров / сек.
Высокий динамический диапазон (HDR) > Индикация перекрытия DOL HDR	(2F 10 бит 30 кадр / с), (3F 10 бит 15 кадр / с)

ТАБЛИЦА 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ CMOS-ДАТЧИКА SONY IMX291

Чип	SONY IMX 291
Физический размер:	Диагональ 6,46 мм (тип 1 / 2,8)
Формат:	16:9
Цветовой фильтр:	RGB
Технология:	Back-illuminated, ГСП
Количество эффективных пикселей:	1920(B)*1080(V), Прибл. 2MP
Размер пикселя	2.9 мкм*2.9 мкм
G чувствительность (тип.):	1300mV
Сигнал насыщения датчика (мин.):	> 914 мВ (цель)
АЦП	12 бит

IV. CCD СИСТЕМЫ НОЧНОГО И ДНЕВНОГО ВИДЕНИЯ

В обсерватории САО РАН постоянно ведутся разработки высокочувствительных подсмотровых систем с возможностью дневного мониторинга неба, окрестностей, положения телескопов и др. [7]. Универсальность такого оборудования зависит не только от типа фотоприемников, но и от систем управления и программного обеспечения. Приведем несколько примеров наших разработок.

A. Ночной телевизионный обзор «Все небо»

ISIT-подсмотр, заменивший впоследствии SIT телевизионный обзор неба также обладал серьезными недостатками. Помимо крупногабаритной конструкции, поле зрения такого прибора было небольшим. А вот вероятность прожигания люминофора фотокатода была даже очень большая. Поэтому вскоре была разработана новая система обзора ночного неба на базе малоформатных высокочувствительных CCD-камер, работающих в автоматическом режиме [8]. Данная система позволила наблюдать звезды до 6-й звездной величины.

B. Круглосуточный телевизионный обзор неба

В 2021 году САО приобрело новую All-sky камеру ОМЕА 3М фирмы ALCOR SYSTEM. На ее основе была создана система All-Sky мониторинга, которая дополнит наш цифровой комплекс видеонаблюдения на ВНП. Камера была установлена на крыше телескопа Цейсс-1000 [9] рядом с другими системами обзора ночного неба (рис. 6).

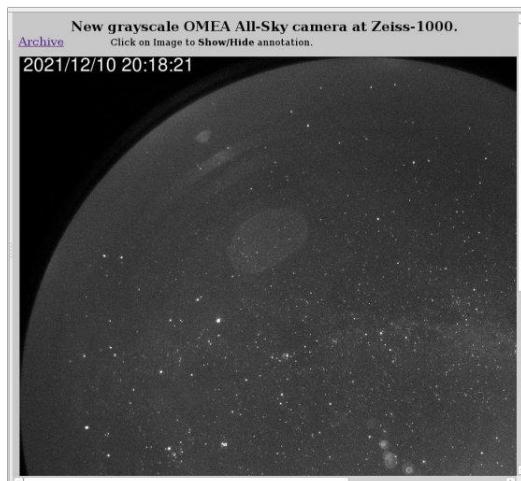


Рис. 6. Мониторинг изображений All-sky камеры ОМЕА

Подключена к Windows-компьютеру zallsky.sao.ru и управляется фирменным приложением, которое по ftp 2 раза в минуту отправляет изображение на Linux-компьютер zarch.sao.ru. На этом компьютере разработан сайт, который не виден из внешнего Интернета. Web-интерфейс для презентации новой системы во внутренней сети и в Интернете разработан на сервере БТА tb.sao.ru. Ссылка на него имеется на главной странице сайта САО. Изображения забираются по протоколу HTTP с сайта компьютера zarch.sao.ru.

Кликом по картинке (рис. 6) можно подключать/отключать аннотацию звезд и созвездий. Для этого разработана специальная программа bta_omea которая, опираясь на дату JPEGфайла вычисляет звездное время, привязывает конфигурацию созвездий, положение планет и объектов из каталога ярких звёзд. Также она имеет интерфейс к системам управления БТА и Цейсс-1000 и рисует их текущее положение на снимке неба вместе с планетами, звёздами и созвездиями (рис. 7).

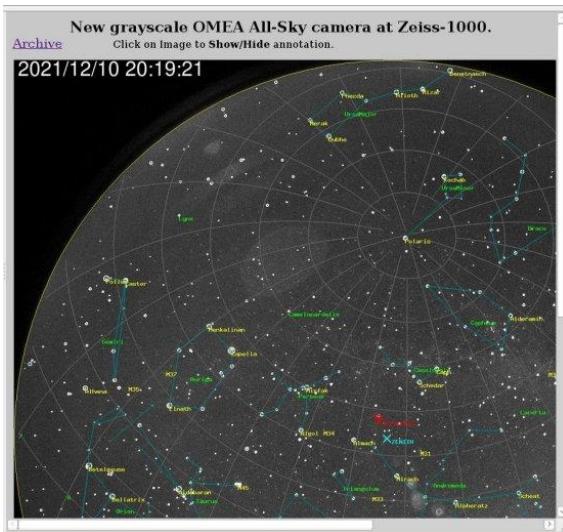


Рис. 7. Изображение вместе с планетами, звёздами и созвездиями

В ночное время каждые 20 минут изображение сохраняется в архиве. Архив рассчитан на неделю хранения. Более старые изображения стираются. Также создается movie кадров последней ночи в виде GIF-файла. Web-интерфейс архива позволяет просматривать movie и любое изображение из архива.

All-sky камера ОМЕА 3М укомплектована метеодатчиками, которые позволяют контролировать температуру воздуха снаружи и внутри камеры, влажность, определять точку росы и задавать параметры подогрева (рис. 8).

V. CMOS СИСТЕМЫ ДНЕВНОГО И НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

A. IP-системы видеонаблюдения

На сегодняшний день проводится масштабная модернизация систем ночного видения [10]. Разрабатывается и уже внедряется в штатную эксплуатацию новое поколение камер круглосуточного мониторинга неба с использованием фотоприёмников массового производства. Новые типы CMOS матриц в настоящее время имеют характеристики, позволяющие получать изображения, удовлетворяющие требованиям работы подсмотров как в ночное, так и дневное время.

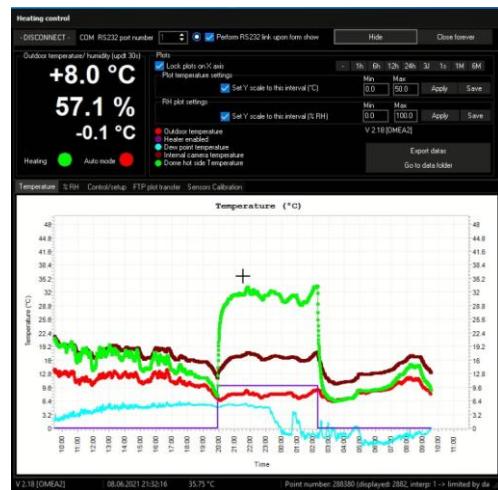


Рис. 8. Мониторинг метео-параметров

Основными плюсами CMOS-фотоприемников также являются относительная дешевизна, простота в использовании. Большинство CMOS-датчиков поставляются с контроллерами, имеющими USB-интерфейс либо Web-интерфейс с подключением к сети Ethernet. Камеры с такими матрицами будут являться уже IP-приемниками. Поэтому модернизация систем ночного видения в обсерватории САО РАН в последнее время проводилась в основном на базе CMOS-датчиков, имеющих интерфейсы с подключением к сети Ethernet. Для замены телевизионных CCD подсмотров – подкупольных камер на БТА и Цейсс-1000, которые уже отработали свой ресурс, были исследованы IP-камеры массового производства. Для начала опробована возможность их работы в качестве системы IP-видеомониторинга охранной системы. Исследования проводились с IP-камерой “ORIENT” (WF-503), выполненной в корпусе цилиндрической формы, защищенным от влаги и пыли в соответствии со стандартом IP66. Она оборудована матрицей CMOS Silicon Opttronics K05 с разрешением 5 Мп и объективом с фиксированным фокусным расстоянием 3.6 мм (~71°/58°), обеспечивающим съемку детализированного видео. Камера имеет систему обнаружения движения. Реалистичная съемка в темноте возможна благодаря встроенной ИК-подсветке. ORIENT WF-503 подключается проводным и беспроводным способом. В данной модели имеется слот под установку карты памяти.

B. CMOS системы мониторинга БТА и Цейсс-1000

В настоящее время проведена модернизация следующих мониторинговых систем, работающих в непрерывном режиме круглосуточно.

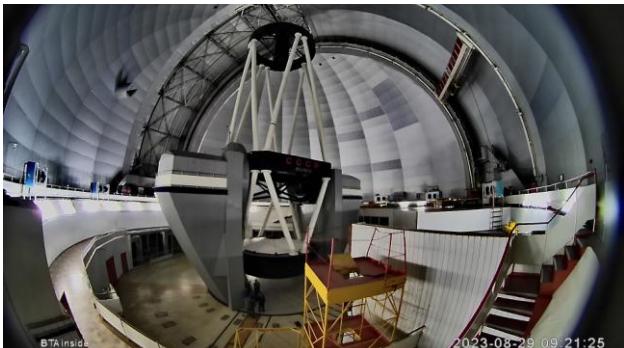
1) Системы мониторинга подкупольного пространства бл телескопа БТА

Для данной системы использована IP-камера на базе CMOS-датчика Sony IMX291, с широкоугольным объективом с фокусным расстоянием F=1,7 мм. Чувствительность датчика позволяет, не используя ИК-подсветки, получать изображение звездного неба через забрало купола (рис. 9).

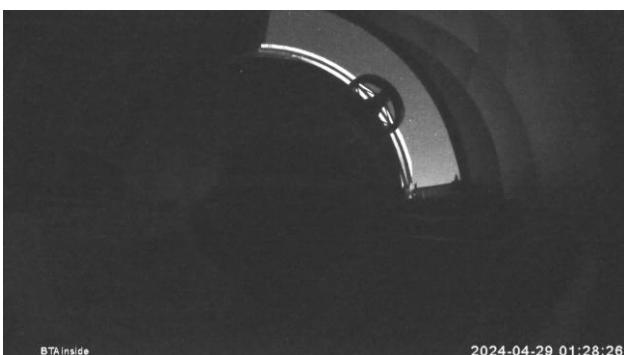
2) Системы мониторинга подкупольного пространства 1м Цейсс-1000

Для данной системы, как и для системы БТА, использована IP-камера на базе CMOS-датчика Sony IMX291, с широкоугольным объективом с фокусным расстоянием

$F=1,7$ мм. Чувствительность датчика позволяет, не используя ИК-подсветки, получать изображение щели за бра на с частью звездного неба (рис. 10). Также для увеличения яркости кадра производится постобработка изображения при помощи ПО ImageMagick, связанная скриптом с исследованием яркости последнего полученного изображения.



2023-08-29 09:21:25



2024-04-29 01:28:26

Рис. 9. Круглосуточный мониторинг подкупольного пространства телескопа БТА. Верхний рисунок – днем, нижний – ночью



2023-08-28 17:28:51



Рис. 10. Круглосуточный мониторинг подкупольного пространства телескопа Цейсс-1000. Вверху – днем, внизу – ночью

3) Система мониторинга погодной обстановки на верхней научной площадке ВНП возле бм телескопа БТА

Для данной системы использована IP-камера на базе CMOS-датчика Sony IMX291, с объективом с фокусным расстоянием $F=6$ мм. Чувствительность датчика позволяет, не используя ИК-подсветки, получать изображение южной части неба над БТА, с уверенным наблюдением звёзд 6-7 зв. величин (рис. 11). Для изменения режимов работы камеры производится исследование яркости последнего полученного изображения, связанное со скриптом переключения режимов работы камеры.



2023-08-29 09:24:02



12-05-2024 22:03:11

Рис. 11. Круглосуточный мониторинг погодной обстановки на ВНП. Верхний рисунок – днем, нижний – ночью

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обсерватории САО РАН ведётся постоянная модернизация подсмотровых систем, как для наблюдательной аппаратуры, так и для систем мониторинга небесной обстановки теперь уже не только ночью, но и днём. В начале работы на БТА создавались громоздкие телевизионные камеры с сильно шумящими и малоформатными изображениями. Но они позволяли видеть и отождествлять наблюдаемые источники с удовлетворительным качеством. При переходе на CCD камеры подсмотры стали менее громоздкими, высокочувствительными, но оставались аналоговыми с небольшим размером кадра. И, наконец, сегодня, при изготовлении CMOS систем мы получаем практически такие же чувствительные камеры, как и с CCD датчиками изображений, но с малыми габаритами и, гораздо, более высоким разрешением получаемого изображения. Кроме того, цифровой сигнал от камеры с IP-управлением сильно упрощает тракт обработки и передачи изображения к наблюдаемым комплексам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров В.В., Фоменко А.Ф. Статистические оценки фундаментальных ограничений на применение типовых ПЗС-камер в составе ТВ-подсмотров больших оптических телескопов. // Астрофизический бюллетень. – 2007. – Т. 62, № 1. – С. 102-105.
2. Комаров В.В., Емельянов Э.В., Шергин В.С., Фокин М.Ю. Системы обзора ночного неба в окрестности крупнейшего российского телескопа БТА САО РАН // XXVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тезисы докладов. – Москва, Россия, 2022. – С. 269-271.
3. Комаров В.В., Фокин М.Ю., Шалдырван И.В. 3D мониторинг небесной полусфера в окрестности крупнейшего российского телескопа БТА САО РАН // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции. – Ростов-на-Дону - Таганрог, 2022. – С. 72-76.
4. Komarov V.V., Vitkovskij V.V., Vlasyuk V.V., Fomenko A.F., Shergin V.S. A digital TV complex of the 6 m optical telescope BTA for identification of astronomical objects and guiding // Astrophysical Bulletin. – 2002. – Т. 53. – С. 134-143.
5. Комаров В.В., Комаров А.В. Цифровые отечественные ПЗС-камеры для оптических телескопов // Прикладная физика. – 2008. – № 4. – С. 142-146.
6. Комаров В.В., Шалдырван И.В., Фокин М.Ю. Создание высокочувствительных IP камер на основе CMOS матриц для Online мониторинга ночного неба // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции. – Ростов-на-Дону - Таганрог, 2022. – С. 77-81.
7. Комаров В.В., Семенко Е.А. Исследование современных полупрофессиональных ПЗС-камер для работы на оптических телескопах среднего класса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 7 (201). – С. 32-46.
8. Комаров В.В. Параметрический синтез наблюдательных систем // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных трудов VIII Всероссийской научной конференции трудов. Южный федеральный университет, 2017. – С. 150-156.
9. Комаров В.В., Москвитин А.С., Бычков В.Д., Буренков А.Н., Драбек С.В., Шергин В.С., Емельянов Э.В., Комарова В.Н., Романенко В.П., Аитов В.Н. ЦЕЙСС-1000 САО РАН: Приборы и методы наблюдений // Астрофизический бюллетень. – 2020. – Т. 75, № 4. – С. 547-564.
10. Комаров В.В., Шалдырван И.В. Модернизация систем ночного видения в обсерватории САО РАН. // XXVII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Материалы конференции. – Москва, Россия, 2024. – С. 430-431.

Оценка мощности локальных токовых генераторов в приземном слое атмосферы

Тимошенко Дмитрий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
dmitrytim@sedu.ru

Куповых Геннадий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kupovukh@sedu.ru

Белоусова Ольга Васильевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
obelousova@sedu.ru

Кудринская Татьяна Владимировна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
tvkudrinskaya@sedu.ru

Аннотация. В предлагаемом исследовании акцент делается на изучение воздействия на электрическое поле в приземном слое явлений турбулентного и конвективного переносов, интерпретируемых в качестве локальных генераторов. Рассматривается совокупность моделей с различным соотношением интенсивностей указанных генераторов, а также с учетом влияния мощности грозового источника, расположенного вблизи области наблюдения, через интенсивность полного тока, входящего в модельное уравнение во всех случаях. Таким образом, возникает возможность оценки влияния грозовых явлений на состояния поля приземного слоя в различной метеообстановке.

Abstract. In the proposed study, the emphasis is on studying the impact on the electric field in the surface layer of the phenomena of turbulent and convective transport, interpreted as local generators. A set of models with different intensity ratios of the indicated generators is considered, as well as taking into account the influence of the power of a lightning source located near the observation area through the intensity of the total current included in the model equation in all cases. Thus, it becomes possible to assess the influence of thunderstorm phenomena on the state of the ground layer field in various weather conditions.

Ключевые слова: электродный эффект, приземный слой атмосферы, мощность источника.

Keywords: electrode effect, surface layer of the atmosphere, source power.

I. ВВЕДЕНИЕ

Явление суточной вариации напряженности электрического поля в приземном слое, хорошо известное в физике атмосферы, преимущественно обусловлено суточными колебаниями потенциала ионосфера, которые, свою очередь, вызваны переменным характером мощности глобального грозового генератора. Однако, наряду с глобальными факторами в формировании структуры поля значительное участие могут принимать и так называемые локальные генераторы. Речь идет прежде всего о процессах турбулентного и конвективного переносов в

приземном слое атмосферы. Их отдельное или совместное присутствие вносят существенные отклонения в суточный ход напряженности поля.

Соответствующие исследования проводились авторами в работах [1–3]. В частности, в [1] рассмотрен электродный эффект в приземном слое в приближении сильного турбулентного перемешивания; случаи конвективно-турбулентного и конвективно-неустойчивого приземного слоя изучены в [2, 3]. В каждом из перечисленных случаев получены соответствующие эффекты, отражающие влияние упомянутых локальных токовых генераторов.

II. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

Основой математических моделей различных типов электродного эффекта, положенных в основу работ [1–3], служило уравнение полного тока в приземном слое, описывающее полный ток как результат совокупного действия соответствующего набора локальных и глобального генераторов.

В результате возникает идея исследования мощности токового генератора соответствующего типа при помощи параметра плотности мощности источника:

$$S = j \cdot E. \quad (1)$$

Величина электрического поля, входящая в соотношение (1), определяется как решение уравнения полного тока для электродного эффекта соответствующего типа. При исследовании мощности локального генератора величина полного тока будет предполагаться постоянной в пределах электродного слоя, тем самым «замораживая» действие глобального грозового генератора и позволяя сосредоточить внимание на действии локального генератора.

Уравнение, описывающее суточный ход напряженности электрического в условиях конвективно-турбулентного электродного эффекта, то есть при совместном действии конвективного и турбулентного токовых генераторов, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial E}{\partial t} - D(t, z) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \chi v(z) \frac{dE}{dz} + 4\pi\lambda E = 4\pi j(t) \quad (2)$$

где $D(t, z)$ – коэффициент турбулентной диффузии; $v(z)$ – скорость вертикального конвективного переноса; λ – электрическая проводимость атмосферы; j – плотность полного тока; z_0 – параметр шероховатости; L – высота электродного слоя.

Соответствующие начальные и граничные условия для уравнения (2) имеют вид:

$$E|_{t=0} = E_0, \quad E|_{z=0} = E_0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=L} = 0, \quad (3)$$

где E_0 – значение напряженности электрического поля у поверхности Земли.

Суточный ход коэффициента турбулентной диффузии будем задавать соотношением [3]:

$$D(t) = D_0 \left(1 + \alpha \sin \left(\frac{\pi}{12}(t-3) + \varphi \right) \right), \quad (4)$$

где D_0 – амплитудный множитель размерности [$\text{м}^2/\text{с}$]; α – безразмерная величина, определяющая интенсивность суточного хода коэффициента турбулентной диффузии.

В случае $\alpha = 0$ получаем случай постоянного на данной высоте D_0 , медленно меняющегося в пределах электродного слоя.

Преобразование временного аргумента в соотношении (4) соответствует синхронизации с временем по Гринвичу и нормировке по суточному циклу.

Соотношение (4) носит экспериментальный характер и является обобщением градиентных измерений в нескольких пунктах наблюдения [2, 4].

Высотная зависимость скорости конвективного переноса определяется соотношением [4]:

$$v(z) = v_1 \frac{z}{l} \left(1 - \frac{z}{l} \right) \quad (5)$$

Соотношения (4) и (5) предполагаются действующими независимо, и в предельных случаях возможно отсутствие одного из типов локальных токовых генераторов [5–8].

Поскольку целью работы является выработка подхода к оценке мощности локальных токовых генераторов, в качестве естественного допущения будем считать плотность тока в пределах электродного слоя величиной постоянной, соответствующей некоторой усредненной мощности глобального грозового генератора. Таким образом предполагается, что суточный ход напряженности

электрического поля преимущественно определяется действием локальных токовых генераторов [8, 9]. Возвращаясь к описанию математической модели, отметим, что она представляет собой начально-краевую задачу (2)–(3) для уравнения параболического типа. В общем случае дифференциальный оператор в левой части (2) не удовлетворяет условиям Штурма–Лиувилля, поэтому задача (2)–(3) при наличии турбулентного и конвективного генераторов нерешаема классическим аналитическим методами, однако, для ее решения подходит, например, метод Галеркина [10]. Суточный ход напряженности электрического поля для данного случая получен авторами в работах [2–3] и определяется соотношением:

$$E(z) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{-\frac{(k+3)\epsilon_0(D_0+v_1)}{T\lambda z_0}} \sin \left(\frac{\pi}{12}(t-3) \right) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k+2} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (6)$$

Отдельно рассмотрим два физически важных предельных случая.

Случай $D_0 = 0, \chi \sim 1$. Данний случай соответствует отсутствию турбулентного токового генератора и действию только конвективных процессов. Для данного случая суточный ход напряженности поля находится аналитически и представляет собой соотношение [3]:

$$E(z) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{-\frac{(k+3)\epsilon_0 v_1}{T\lambda z_0}} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (7)$$

Случай $D_0 \neq 0, \chi \ll 1$. Данний случай соответствует наличию турбулентного токового генератора и отсутствию конвективных процессов в приземном слое. Для данного случая задача (2) – (3) также допускает аналитическое решение [3]:

$$E(z) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{-\frac{(k+3)\epsilon_0 D_0}{T\lambda z_0}} \sin \left(\frac{\pi}{12}(t-3) \right) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (8)$$

Таким образом, можно рассмотреть плотности мощностей источников для трех случаев приземного слоя атмосферы: конвективно-турбулентного; приближения сильного турбулентного перемешивания и конвективно-неустойчивого приземного слоя.

В каждом из указанных случаев оценку мощности генератора можно провести путем вычисления значения величины (1) по известным значениям плотности тока и напряженности в соответствующий момент времени и точке приземного слоя, которое задается соотношениями (6)–(8).

ТАБЛИЦА 1 ОЦЕНКА ОБЩЕЙ МОЩНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО И КОНВЕКТИВНОГО ТОКОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Параметр/время, ч.	0	6	12	18	24
E , В/м	95	83	103	127	97
D , м/с	0,01	0,03	0,07	0,05	0,01
v , м/с	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
S , Вт/м ³	0,095	0,249	0,721	0,635	0,097

В табл. 1 приведен пример оценки мощности совместно действующих турбулентного и конвективного токовых генераторов в приземном слое атмосферы. Как видно из таблицы, наблюдается суточная вариация совокупной

мощности локальных токовых генераторов, что подтверждает данные градиентных измерений коэффициента турбулентной диффузии, рассмотренные в [2].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен теоретический подход к оценке мощности локальных токовых генераторов в приземном слое атмосферы. Найденные авторами ранее закономерности суточных вариаций поля в приземном слое для различных стратификаций атмосферы позволяют оценить как совместную мощность указанных токовых генераторов, так и мощность каждого генератора в отдельности в зависимости от соответствующих условий в приземном слое атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аджисев А.Х., Клево А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 452–461.
2. Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Клево А.Г., Кудринская Т.В. Влияние электродного эффекта на суточные вариации электрического поля атмосферы в приземном слое // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – 36, № 10. – С. 834–838.
3. Белоусова О.В., Тимошенко Д.В., Куповых Г.В. Структура электрического поля в конвективно-турбулентном приземном слое атмосферы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. – 2024. – № 2. – С. 57–65. – DOI: 10.18522/1026-2237-2024-2-57-65.
4. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя: монография. – СПб.: Астерион, 2017. – 307 с.
5. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.
6. Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 114 с.
7. Имянитов И.М., Колоколов В.П. Исследования электрического поля атмосферы // Труды ГГО. – 1974. – Вып. 334. – С. 232–250.
8. Willet J.C. The turbulent electrode effect as influenced by interfacial ion transfer // J.Geoph.Res. – 1983. – Vol. 88. – P. 8453–8469.
9. Harrison R.G. The Carnegie curve // Surveys in Geophysics. – 2013. – 34 (2). – P. 209–232.
10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 6-е изд. – М.: Наука 1999. – 736 с.

Новый алгоритм приведения двумерного уравнения эллиптического типа к каноническому виду

Илюхин Александр Алексеевич
 Институт компьютерных технологий
 и информационной безопасности
 Южный федеральный университет
 Таганрог, Россия
 aleilyukhin@yandex.ru

Клово Александр Георгиевич
 Институт компьютерных технологий
 и информационной безопасности
 Южный федеральный университет
 Таганрог, Россия
 agklovo@sedu.ru

Аннотация. Основная цель работы дать исследователю, использующему уравнения в частных производных эллиптического типа, возможность достаточно простого и надежного способа приведения уравнения к виду, где в его главной части присутствует оператор Лапласа. В отличие от известных ранее методов нормализации уравнений математической физики предложен алгоритм приведения уравнения эллиптического типа к каноническому виду, который не требует перехода в комплексную плоскость. Для реализации этого алгоритма необходимо решить обыкновенные дифференциальные уравнения, которые проще характеристических уравнений в гиперболическом случае. Решение поставленной задачи сводится к алгоритму построения решения системы обыкновенных уравнений достаточно простого вида и осуществляется в исходной области в плоскости действительных переменных.

Abstract. The main objective of the work to give researchers using partial differential equations of elliptic type, the ability to fairly simple and reliable way to bring the equation to the form, where it is present the main part of the Laplace operator. Unlike the known the algorithm of reduction of the equation of elliptic type to a canonical form which doesn't demand transition to complex area is earlier offered. For realization of this algorithm it is necessary to solve the ordinary differential equation which is simpler than the characteristic equations in a hyperbolic case. The solution of the problem is reduced to an algorithm for constructing solutions of the system of ordinary differential equations of the form rather simple and is carried out in the source area in the plane of the real variables.

Ключевые слова: уравнения математической физики, эллиптический тип, канонический вид.

Keywords: equations of mathematical physics, elliptic type, canonical form.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим линейное дифференциальное уравнение второго порядка с частными производными [1]:

$$\begin{aligned} & a_{11}u_{xx} + 2a_{12}u_{xy} + a_{22}u_{yy} + \\ & + 2a_{13}u_x + 2a_{23}u_y + a_{33}u = f, \end{aligned} \quad (1)$$

где коэффициенты a_{ij} и f , являются функциями переменных x и y , причем точка (x, y) принадлежит общей области G определения всех функций, входящих в уравнение (1), в том числе и неизвестной функции

$u(x, y)$. Границные условия не участвуют при решении поставленной задачи, поэтому предположений о типе граничной задачи сделано не будет.

Исследуем возможность упрощения уравнения при условии $a_{12}^2 - a_{11}a_{22} < 0$. В этом случае правые части уравнений (12.27) и (12.28) в пособии [2] при действительных значениях x и y принимают комплексные значения, причём комплексно-сопряжённые. Это послужило основанием в некоторых учебных пособиях считать решения уравнений (12.27) и (12.28) в [2] комплексно-сопряжёнными функциями. При этом авторы не учитывают, что для комплексных значений функции $u(x)$ (x можно считать действительной переменной – она является независимой, её действительность можно принять по определению) коэффициенты $a_{11}(x, y)$, $a_{12}(x, y)$ и $a_{22}(x, y)$ будут, скорее всего, принимать комплексные значения, для которых правые части в (12.27) и (12.28) не будут сопряжёнными.

Замечание. Необходимо помнить, что функции переменных x, y можно рассматривать только в области определения D , где x и y принимают только действительные значения. В то же время функции $\xi(x, y)$ и $\eta(x, y)$ в области D будут комплексно – значными. В указанном источнике из уравнений (12.27) и (12.28) не следует, что производные в (12.31) в [2] будут комплексно - сопряженными, т.е.

$$y_1(x) = \overline{y_2(x)} \text{ или } \frac{\xi_x}{\xi_y} = \overline{\left(\frac{\eta_x}{\eta_y} \right)} = \frac{\bar{\eta}_x}{\bar{\eta}_y}.$$

Поэтому возникает естественный вопрос: почему упрощение уравнения (1) можно проводить по той же схеме, что и в случае $a_{12}^2 - a_{11}a_{22} \geq 0$.

Если для любого из двух дифференциальных уравнений (12.27) и (12.28) в [2] взять начальные значения $(x_0, y_0) \in D$, то в силу того, что правые части в этих уравнениях в точке (x_0, y_0) будут принимать комплексные значения, производная

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{(x_0, y_0)} - \text{комплексная величина. Тогда траектории дифференциальных уравнений (12.8) и (12.9) выйдут из плоскости } (x, y), \text{ а,}$$

следовательно, из области D . Возникает еще один вопрос: каким образом будут определяться вне области D все функции переменных x и y , в частности, коэффициенты a_{11} , a_{12} и a_{22} , входящие в уравнения (12.8) и (12.9)? Если эти функции доопределить вне области D с сохранением необходимой гладкости, то для комплексных значений аргументов функции $a_{ij}(x, y)$ будут принимать комплексные значения. Но для комплексных значений a_{ij} правые части в уравнениях (12.27) и (12.28) не будут комплексно – сопряженными. Следовательно, интегралы этих уравнений

$$\varphi(x, y) = C_1, \psi(x, y) = C_2 \quad (2)$$

не будут комплексно – сопряженными. Поэтому рассматривая комплексную замену переменных

$$\xi = \varphi(x, y), \eta = \psi(x, y), \quad (3)$$

не получим комплексно – сопряженные переменные ξ и η . Но это означает, что традиционная замена переменных

$$\alpha = \frac{\xi + \eta}{2}, \beta = \frac{\xi - \eta}{2i}$$

не приводит к действительным аргументам α и β . Следовательно, для этих переменных вид главной части $U_{\alpha\alpha} + U_{\beta\beta}$, не есть канонический в силу комплексности аргументов α и β .

Утверждение. В уравнении эллиптического типа главная часть не может быть действительной заменой приведена к виду, содержащему лишь одну частную производную, т.к. его дискриминант будет равным нулю, либо будет отличным от нуля коэффициент при смешанной производной.

Поэтому поставим изначально задачу обратить в нуль только один коэффициент. Чтобы эллиптический тип уравнения сохранился в качестве такового, в преобразованном уравнении должен обратиться в нуль коэффициент при смешанной производной:

$$A_{12} = a_{11}\xi_x\eta_x + a_{12}(\xi_x\eta_y + \xi_y\eta_x) + a_{22}\xi_y\eta_y = 0. \quad (4)$$

Запишем это равенство в следующем виде

$$\begin{aligned} & (a_{11}\eta_x + a_{12}\eta_y)\xi_x + \\ & + (a_{12}\eta_x + a_{22}\eta_y)\xi_y = \\ & = (a_{11}\xi_x + a_{12}\xi_y)\eta_x + \\ & + (a_{12}\xi_x + a_{22}\xi_y)\eta_y = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как для отыскания замены переменных (3) возникает только одно уравнение (4), то имеющийся произвол можно устраниТЬ, рассмотрев один из четырех вариантов:

$$1) \begin{cases} a_{11}\eta_x + a_{12}\eta_y = 0, \\ \xi_y = 0; \end{cases}$$

$$2) \begin{cases} a_{12}\eta_x + a_{22}\eta_y = 0, \\ \xi_x = 0; \end{cases}$$

$$3) \begin{cases} a_{12}\xi_x + a_{22}\xi_y = 0, \\ \eta_x = 0; \end{cases}$$

$$4) \begin{cases} a_{11}\xi_x + a_{12}\xi_y = 0, \\ \eta_y = 0. \end{cases}$$

Сформулируем основную **задачу** данной работы:

Указать последовательность невырожденных преобразований независимых переменных, в результате реализации которой главная часть уравнения (1) примет вид суммы вторых производных с равными коэффициентами, а коэффициент при смешанной производной будет равен нулю.

Изначально предполагаем, что уравнение (1) в G есть уравнение эллиптического типа, т.е.

$$a_{12}^2 - a_{11}a_2 > 0.$$

В некоторых учебных пособиях при преобразовании уравнения эллиптического типа вначале идут по тому же пути, что и в случае гиперболического уравнения (приводят главную часть к виду, содержащему только смешанную производную), а затем преобразованием, в котором выделяется действительная и мнимая части у последних переменных уравнение эллиптического типа записывается в требуемом виде. Однако подобный эксперимент не применим при решении научных задач.

Первый этап преобразования. В связи с тем, что сокращение числа членов в главной части уравнения эллиптического типа может быть сделано единственным образом, а именно, только избавлением слагаемого со смешанной производной. Зададимся целью достичь этого за счет выбора соответствующего преобразования. Пусть задано преобразование вида

$$\xi = \xi(x, y), \eta = \eta(x, y). \quad (6)$$

В результате этого преобразования коэффициент A_{12} перед смешанной производной $u_{\xi\eta}$ примет вид:

$$A_{12} = a_{11}\xi_x\eta_x + a_{12}(\xi_x\eta_y + \xi_y\eta_x) + a_{22}\xi_y\eta_y. \quad (7)$$

Запишем равенство (7) в следующем виде, приравняв нуль коэффициент A_{12}

$$\begin{aligned} A_{12} &= (a_{11}\xi_x + a_{12}\xi_y)\eta_x + \\ &+ (a_{12}\xi_x + a_{22}\xi_y)\eta_y = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как для отыскания замены переменных (3) возникает только одно уравнение (5), то имеющийся произвол можно устраниТЬ, рассмотрев один из четырех вариантов:

$$1) \begin{cases} a_{11}\eta_x + a_{12}\eta_y = 0, \\ \xi_y = 0; \end{cases}$$

$$2) \begin{cases} a_{12}\eta_x + a_{22}\eta_y = 0, \\ \xi_x = 0; \end{cases}$$

$$3) \begin{cases} a_{12}\xi_x + a_{22}\xi_y = 0, \\ \eta_x = 0; \end{cases}$$

$$4) \begin{cases} a_{11}\xi_x + a_{12}\xi_y = 0, \\ \eta_y = 0. \end{cases}$$

Возможны ещё два варианта приравнивания к нулю сомножителей в равенстве (7), но один из них $\xi_x = \xi_y = 0$ или $\eta_x = \eta_y = 0$ приводит к тому, что либо $\xi = \text{const}$, либо $\eta = \text{const}$. Этого не может быть, так как ξ и η в новых переменных являются аргументами функции $u(\xi, \eta)$, область определения которой выродилась бы в одномерную область $\xi = \text{const}$ или $\eta = \text{const}$, что может быть только при вырожденном отображении области D . Второй вариант, когда выполнен один из двух вариантов

$$1) \begin{cases} a_{11}\eta_x + a_{12}\eta_y = 0, \\ a_{12}\eta_x + a_{22}\eta_y = 0; \end{cases}$$

$$2) \begin{cases} a_{11}\xi_x + a_{12}\xi_y = 0, \\ a_{12}\xi_x + a_{22}\xi_y = 0. \end{cases}$$

В силу неравенства нулю

$$a_{11}a_{22} - a_{12}^2 < 0,$$

выполненного для каждой из этих систем, справедливо одно из двух условий $\eta_x = \eta_y = 0$ либо $\xi_x = \xi_y = 0$. Тем самым возникает ситуация из предыдущего варианта.

В каждом из этих вариантов одна из «новых» переменных связана только с одной из «старых» переменных. Следует отметить, что варианты 1) и 4) по существу совпадают. Точно также совпадают варианты 2) и 3). Отличие состоит только в обмене ролями между переменными ξ и η , или, что то же самое в замене обозначений для новых переменных.

Изучению подлежит лишь случай, когда все три коэффициента a_{11} , a_{12} и a_{22} , не обращаются в нуль. Поэтому можно остановиться на первом случае

$$\begin{cases} a_{11}\eta_x + a_{12}\eta_y = 0, \\ \xi_y = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Из второго уравнения следует, что $\xi = \xi(x)$. Так как выполнено уравнение

$$a_{11}\eta_x + a_{12}\eta_y = 0, \quad (10)$$

то справедлива следующая теорема.

Теорема. Для того, чтобы функция $\eta = \eta(x, y)$ была решением уравнения (8) в области D , необходимо и достаточно, чтобы соотношение

$$\eta(x, y) = C \quad (11)$$

в области D определяло общий интеграл уравнения

$$a_{11}(x, y)dy - a_{12}(x, y)dx = 0.$$

Доказательство теоремы приведено в [2].

Таким образом, функция $\eta(x, y)$, стоящая в правой части интеграла (11), является решением уравнения в частных производных (5), а замена переменных $\xi = \xi(x)$, $\eta = \eta(x, y)$ обращает в нуль в преобразованном уравнении (4) коэффициент $A_{12} = 0$. Если выбрать произвольную функцию $\xi(x)$ такой, что $\xi_x \neq 0$ ни в одной точке области D , то для невырожденности предлагаемого преобразования переменных из якобиана преобразования

$$I = \begin{vmatrix} \xi_x & 0 \\ \eta_x & \eta_y \end{vmatrix}$$

следует, что $\eta_y \neq 0$. Это условие естественно, т.к. ξ зависит только от x , то вторая переменная η обязана зависеть от y .

В предлагаемой замене переменных имеется определённый произвол: $\xi(x)$ – произвольная функция, и хотя $\eta(x, y) = C$, интеграл уравнения (10), но достаточно гладкая функция $f(\eta(x, y)) = C$ также является интегралом. Поэтому поставим задачу: одновременно с равенством $A_{12} = 0$ подобрать $\xi = \xi(x)$ и $\eta = \eta(x, y)$ так, чтобы выполнялось ещё одно равенство

$$A_{11} = A_{22} = A, \quad (12)$$

которое обеспечит следующий вид главной части:

$$A\left(\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2}\right) + F(u_\xi, u_\eta, u, \xi, \eta) = 0. \quad (13)$$

Предварительно преобразуем равенство (12) с учётом того, что равенство $A_{12} = 0$ получено при условиях (7):

$$A_{11} = a_{11}(\xi_x)^2,$$

$$A_{22} = a_{11}(\eta_x)^2 + 2a_{12}\eta_x\eta_y + a_{11}(\eta_y)^2 = \\ = (a_{11}\eta_x + a_{12}\eta_y)\eta_x + (a_{12}\eta_x + a_{22}\eta_y)\eta_y$$

Так как в силу уравнения (10) первая скобка равна нулю, то

$$A_{22} = (a_{12}\eta_x + a_{22}\eta_y)\eta_y.$$

Тогда равенство (12) можно записать в виде

$$a_{11}(\xi_x)^2 = a_{12}\eta_x\eta_y + a_{22}(\eta_y)^2.$$

С учетом невырожденности проводимого преобразования можно поделить это равенство на $(\eta_y)^2 \neq 0$ и в результате получить

$$a_{11}\left(\frac{\xi_x}{\eta_y}\right)^2 = a_{12}\frac{\eta_x}{\eta_y} + a_{22}.$$

Найдём отношение η_x/η_y из соотношения (8) и его подставим в последнее равенство

$$\left(\frac{\xi_x}{\eta_y}\right)^2 = \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}^2}{a_{11}^2} > 0.$$

Таким образом, равенство возможно. Для того, чтобы из него можно было определить ξ_x , необходимо и достаточно, чтобы в равенстве

$$(\xi_x)^2 = \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}^2}{a_{11}^2} (\eta_y)^2 \quad (14)$$

и его правая часть зависела только от x . Выполнение этого условия позволит определить функцию $\xi = \xi(x)$ вместе с функцией $\eta = \eta(x, y)$, найденной из уравнения $a_{12}\eta_x + a_{12}\eta_y = 0$. Эти две функции зададут преобразование, с помощью которого уравнение (1) будет иметь вид (13), называемый **каноническим** для уравнения эллиптического типа. Если же с помощью равенства (13) в силу того, что его правая часть не будет удовлетворять необходимому условию и потому нельзя будет определить ξ_x , то для приведения уравнения эллиптического типа к каноническому виду можно использовать вторую возможность, решив систему

$$\begin{cases} a_{12}\eta_x + a_{22}\eta_y = 0, \\ \xi_x = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Тогда необходимым и достаточным условием приведения к каноническому виду уравнения (1) будет условие

$$(\xi_y)^2 = \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}^2}{a_{22}^2} (\eta_x)^2, \quad (16)$$

где правая часть должна зависеть только от y . Проверка условий (12) или (14) возможна только после решения соответственно уравнений $a_{11}\eta_x + a_{12}\eta_y = 0$ или $a_{12}\eta_x + a_{22}\eta_y = 0$, вместо которых согласно теореме можно использовать общий интеграл одного из характеристических уравнений

$$a_{11}dy - a_{12}dx = 0 \text{ или } a_{12}dy - a_{22}dx = 0.$$

II. Вывод

При интегрировании уравнений (14) или (16) требование зависимости только от одной переменной не является обязательным, т.к. из интегралов соответствующих характеристических уравнений можно выразить одну из переменных через другую и затем из правых частей уравнений (14) или (16) ненужную переменную исключить. В результате получим зависимость только от одной переменной, по которой слева в уравнении (14) или (16) осуществляется дифференцирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Векуа И.Н. Обобщенные аналитические функции. – М.: Физматгиз, 1959. – 630 с.
2. Илюхин А.А. Уравнения математической физики. – Таганрог: Изд-во ТГПИ, 2010. – 167 с.

Управление неоднородной струной

Клово Александр Георгиевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
`agklovo@sedu.ru`

Куповых Геннадий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
`kupovukh@sedu.ru`

Аннотация. Целью работы является анализ изменения методов решения задач оптимального управления колебаниями струны при переходе от управления однородной струной к задачам управления струной неоднородной. При этом исследуются два аспекта. Во-первых, правильный выбор минимизируемого квадратичного функционала в фиксированый момент времени, что влияет на возможность синтеза оптимального управления. Во-вторых, в отличии от задач управления однородной струной, для управления неоднородной струной возникает необходимость применения численных методов. При этом возникает новый тип задач – задачи оптимизации численных методов. Этот вопрос также в определенной степени исследуется в данной работе.

Abstract. The purpose of the work is to analyze the change in methods for solving problems of optimal control of string vibrations during the transition from control of a homogeneous string to control of a non-homogeneous string. In doing so, two aspects are explored. First, the correct choice of the minimized quadratic functional at a fixed point in time, which affects the ability to synthesize optimal control. Secondly, in contrast to the tasks of controlling a homogeneous string, it becomes necessary to use numerical methods to control a heterogeneous string. In this case, a new type of problem arises - the problem of optimizing numerical methods. This issue is also investigated to a certain extent in this work.

Ключевые слова: уравнения математической физики, оптимальное управление, всюду-оптимальность, разностные методы.

Keywords: equations of mathematical physics, optimal control, everywhere-optimality, difference methods.

I. ВВЕДЕНИЕ

Задачи управления являются фундаментальными не только в науке, но и в обществе. Нас интересуют те задачи управления, в постановку которых входят математические модели. Если изучаемые процессы описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, то такие задачи называются задачами управления системами с сосредоточенными параметрами. Ключевой здесь является работа [1], в которой сформулирован метод, названный принципом максимума Понтрягина. В работе [2] сделана попытка перенести этот принцип на задачи, в постановке которых участвуют дифференциальные уравнения с частными производными. Также задачи управления для уравнений математической физики рассматриваются в других приведенных источниках. Книга [3] французских математиков Р. Латтеса, Ж.-Л. Лионса

посвящена некоторым корректным и некорректным задачам. В частности, здесь обращается внимание на задачи управления однородной струной и возможность приведения ее в заданное состояние.

В статьях [4, 5], а также в других работах этих авторов и их учеников рассмотрены многие задачи, связанные с оптимальным управлением простейшей однородной струны и приведения ее в заданное состояние. Решения приводились в различных функциональных пространствах. Фундаментальные обоснования необходимости рассмотрения обобщенных решений задач управления и ряда других задач приведены в работах [6–8]. Здесь показаны различные определения подходящих функциональных пространств и соответствующих обобщенных решений. Показано, что в этих случаях минимизирующие заданный функционал последовательности имеют сходящиеся подпоследовательности, что в конце концов позволяет доказывать соответствующие теоремы существования и единственности.

В работах [9–13] исследован новый аспект оптимального управления колебаниями однородной струны. Здесь показано, при каких условиях появляется возможность синтеза оптимального управления колебаниями струны. Показано, что этот вопрос связан с правильным выбором функционала, который надо минимизировать. В работе [14] показаны проблемы, связанные с переходом от однородной струны к неоднородной. В этом случае не удается получать решения поставленных задач в явном виде. Поэтому в работе применяются соответствующие численные методы. При этом анализируется вопрос о сохранении тех результатов, которые получены для однородной струны.

При решении задач управления численными методами мы будем использовать методику академика А.А. Самарского ([15, 16]).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть неоднородная струна $[0; l]$, определяемая функцией $u(t, x)$ – отклонением точки струны с координатой x в момент времени t , совершает свободные колебания. Если неоднородность струны характеризуется функцией $a(x) > 0$, то уравнение колебаний такой струны имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right). \quad (2.1)$$

Для однозначного определения искомой функции надо задать дополнительные условия. Это будут соотношения

$$u|_{t=0} = \varphi(x), \quad \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = \psi(x), \quad (2.2)$$

которые определяют начальный профиль струны $\varphi(x)$ и начальные скорости точек заданной струны $\psi(x)$. Так же необходимы граничные условия. На левом конце $x=0$ это будет соотношение

$$u|_{x=0} = 0, \quad (2.3)$$

означающее, что левый конец струны закреплен. На правом конце $x=l$ условие

$$u|_{x=l} = p(t), \quad (2.4)$$

означает его движение по закону $p(t)$. Функцию $p(t)$ мы будем называть управляющей функцией.

Рассматривая задачу (2.1)–(2.4) в пространственно-временной области $D_{0,T} = [0;T] \times [0;l]$, отметим, что в некоторых точках функция задана дважды. Поэтому при поиске решения надо задать условия согласования. Отметим вначале условия

$$\varphi(0) = 0, \quad \varphi(l) = p(0). \quad (2.5)$$

Условия (2.5) должны быть всегда выполнены, как в случае классического решения, так и в случае обобщенного решения. Для классического решения надо задать также дополнительные условия согласования

$$\psi(0) = 0, \quad p'(0) = \psi(l). \quad (2.6)$$

Целью управления колебаниями струны является ее приведение в заданное состояние. В силу корректности обратной задачи для гиперболических уравнений в качестве заданного можно взять нулевое состояние струны. Это состояние определяется условиями $u = \frac{\partial u}{\partial t} = 0$ в фиксированный момент времени $t = \tau$.

Важным является вопрос о возможности построения всюду-оптимального управления. Такое управление обладает следующим свойством. Если управление $p_1(t)$ является оптимальным на отрезке времени $[0; \tau_1]$, а управление $p_2(t)$ является оптимальным на большем отрезке времени $[0; \tau_2]$, то этим управления совпадают на общем временном отрезке $[0; \tau_1]$. Свойство всюду-оптимальности позволяет искать оптимальное управление а меньших временных промежуткахЮ вплоть до поточечного поиска.

В работах [9–13] показано, что в задачах оптимального управления однородной струной с критерием оптимальности в виде минимизации квадратичного функционала всюду-оптимальность обеспечивает тот функционал, который пропорционален энергии струны. Поэтому будем искать аналогичный функционал для неоднородной струны.

III. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОЖДЕСТВО

Рассмотрим область $D_{t_1 t_2} = [t_1; t_2] \times [0; l]$ и уравнение (2.1) в этой области. Умножим обе части (2.1) на частную производную $\frac{\partial u}{\partial t}$ и проинтегрируем обе части полученного равенства по области $D_{t_1 t_2}$. Применяя формулы интегрирования по частям и меняя порядок интегрирования в двойных интегралах, проведем следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \iint_{D_{t_1 t_2}} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \frac{\partial u}{\partial t} dt dx &= \frac{1}{2} \int_0^l \left(\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 dt \right) dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \left(\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \Big|_{t=t_2} - \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \Big|_{t=t_1} \right) dx, \\ \iint_{D_{t_1 t_2}} \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dt dx &= \int_{t_1}^{t_2} a(l) \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} \cdot \frac{dp}{dt} dt - \\ &\quad - \iint_{D_{t_1 t_2}} a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} dt dx = \\ &= \int_{t_1}^{t_2} a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{x=l} dt - \frac{1}{2} \int_0^l \left(\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial}{\partial t} \left(a(x) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) dt \right) dx = \\ &= \int_{t_1}^{t_2} a(l) \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} \cdot \frac{dp}{dt} dt - \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_0^l \left(\left(a(x) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \Big|_{t=t_2} - \left(a(x) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \Big|_{t=t_1} \right) dx. \end{aligned}$$

Поэтому мы приходим к тождеству

$$\begin{aligned} \int_0^l \left(\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \Big|_{t=\tau} dx &= \\ &= \int_0^l \left(\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \Big|_{t=\tau} dx + \\ &\quad + 2 \int_{t_1}^{t_2} a(l) \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} \cdot \frac{dp}{dt} dt. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Полученное тождество (3.1) мы можем назвать энергетическим. Оно показывает, что при нулевом воздействии управляющей функции, т.е. при условии $\frac{dp}{dt} = 0$ при колебаниях струны не меняется величина

$$\int_0^l \left(\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \Big|_{t=\tau} dx. \quad (3.2)$$

По аналогии с ситуацией, исследованной при поиске всюду-оптимального управления однородной струной, логично предположить, что именно функционал (3.2) обеспечивает возможность построения всюду-оптимального управления неоднородной струной.

IV. ПОСТРОЕНИЕ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ

В области $D_{0,T} = [0;T] \times [0;L]$ введем сеточную функцию следующим образом.

Рассмотрим точки $x_i = ih$, $i = 0, 1, \dots, N_x$, образующие сетку на оси абсцисс с шагом $h = \frac{l}{N_x}$. Также рассмотрим точки $t_j = j\tau$, $j = 0, 1, \dots, N_t$, образующие сетку на оси ординат с шагом $\tau = \frac{T}{N_t}$.

Отсюда мы можем построить двумерную сетку $(x_i; t_j)$, $i = 0, 1, \dots, N_x$, $j = 0, 1, \dots, N_t$ в области $D = [0;L] \times [0;T]$ на Oxt .

На построенной сетке введем сеточную функцию $u_i^j = u(x_i; t_j)$ с теми же значениями индексов. Наша цель – найти сеточную функцию, приближающую исходную функцию в узлах сетки.

Для этого рассмотрим правую и левую разностные производные

$$\Lambda_t u_i^j = \frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\tau}, \quad \Lambda_{\bar{t}} u_i^j = \frac{u_i^j - u_i^{j-1}}{\tau}.$$

С их помощью аппроксимируем смешанную разностную производную

$$\Lambda_{\bar{t}t} u_i^j = \frac{u_i^{j+1} - 2u_i^j + u_i^{j-1}}{\tau^2}, \quad (4.1)$$

приближающую $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ с достаточно большой точностью, с порядком аппроксимации $O(\tau^2)$.

Для аппроксимации производной $\frac{\partial u}{\partial x}$ по пространственной переменной рассмотрим разностные отношения

$$\Lambda_x u_i^j = \frac{u_{i+1}^j - u_i^j}{h}, \quad \Lambda_{\bar{x}} u_i^j = \frac{u_i^j - u_{i-1}^j}{h},$$

приближающие пространственные производные 1-го порядка.

Теперь можем приблизить вторую производную

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

выражением

$$\frac{a_{i+0.5}(u_{i+1}^j - u_i^j) - a_{i-0.5}(u_i^j - u_{i-1}^j)}{h^2}.$$

Теперь мы можем перейти к аппроксимации (2.1) разностным уравнением

$$\frac{u_i^{j+1} - 2u_i^j + u_i^{j-1}}{\tau^2} = \frac{a_{i+0.5}(u_{i+1}^j - u_i^j) - a_{i-0.5}(u_i^j - u_{i-1}^j)}{h^2}, \quad (4.2)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_x - 1, j = 1, 2, \dots, N_t - 1,$$

где

$$a_{i-0.5} = a(x_i - 0.5h), \quad a_{i+0.5} = a(x_i + 0.5h).$$

После записи дополнительных условий

$$u_i^0 = u(0, x_i) = \varphi(x_i), \quad u_i^1 = u_i^0 + \tau \psi(x_i)$$

мы можем получить прямые формулы послойного решения полученной системы уравнений, соответствующей написанной явной разностной схеме.

V. НЕЯВНЫЕ РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ

Чтобы перейти к неявной разностной схеме запишем уравнение (4.2) в виде

$$\Lambda_{\bar{t}t} u_i^j = \Lambda_{\bar{x}x} u_i^j.$$

Теперь заменим его на уравнение

$$\begin{aligned} \Lambda_{\bar{t}t} u_i^j &= \sigma_1 \Lambda_{\bar{x}x} u_i^{j+1} + \\ &+ (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \Lambda_{\bar{x}x} u_i^j + \sigma_2 \Lambda_{\bar{x}x} u_i^{j-1}, \\ i &= 1, 2, \dots, N_x - 1, j = 1, 2, \dots, N_t - 1. \end{aligned} \quad (4.3)$$

где σ_1, σ_2 – параметры. Если для написанной задачи найдено решение на $j-1$ -м и j -м слоях, то для поиска решения на $j+1$ -м слое записываем систему

$$\begin{aligned} u_0^{j+1} &= 0, \quad u_{N_x}^{j+1} = p(t_{j+1}) = p_{j+1}, \\ u_i^{j+1} &+ \sigma_1 \left(\frac{-a_{i-0.5} u_{i-1}^{j+1}}{h^2} + \left(\frac{(a_{i+0.5} + a_{i-0.5}) u_i^{j+1}}{h^2} \right) - \right. \\ &\left. - \frac{a_{i+0.5} u_{i+1}^{j+1}}{h^2} \right) = \frac{2u_i^j}{\tau^2} - \frac{u_i^{j-1}}{\tau^2} - (1 - \sigma_1 - \sigma_2) \times \\ &\times \left(\frac{-a_{i-0.5} u_{i-1}^j}{h^2} + \left(\frac{(a_{i+0.5} + a_{i-0.5}) u_i^j}{h^2} \right) - \frac{a_{i+0.5} u_{i+1}^j}{h^2} \right) - \\ &- \sigma_2 \times \left(\frac{-a_{i-0.5} u_{i-1}^{j-1}}{h^2} + \left(\frac{(a_{i+0.5} + a_{i-0.5}) u_i^{j-1}}{h^2} \right) - \right. \\ &\left. - \frac{a_{i+0.5} u_{i+1}^{j-1}}{h^2} \right), \quad i = 1, 2, \dots, N_x - 1. \end{aligned}$$

Полученная система имеет трехдиагональный вид с диагональным преобладанием и может быть решена эффективным методом прогонки.

V. СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ

Для исследования возможности синтеза оптимального управления при использовании разностных схем снова рассмотрим разностную схему (4.2) и умножим обе части на центральную разностную производную

$$\frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau}$$

и обе части полученного равенства

$$\Lambda_{ii} u_i^j \cdot (u_i^j)_{t'} = \frac{1}{2\tau} \left(\left(u_i^j \right)_t^2 - \left(u_i^j \right)_{\bar{t}}^2 \right)$$

просуммируем по $i=1,2,3,\dots,N_x-1$, вводя обозначения

$$\begin{aligned} \Lambda_{ii} u_i^j &= \frac{u_i^{j+1} - 2u_i^j + u_i^{j-1}}{\tau^2}, \quad (u_i^j)_{t'} = \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2\tau}, \\ (u_i^j)_t &= \Lambda_t u_i^j = \frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\tau}, \quad (u_i^j)_{\bar{t}} = \Lambda_{\bar{t}} u_i^j = \frac{u_i^j - u_i^{j-1}}{\tau}. \end{aligned}$$

В итоге мы получим разностный аналог энергии струны.

VI. ВЫВОДЫ

При исследовании оптимального управления системами с распределенными параметрами, в частности, при решении задач управления струной возникает ряд проблем. Первой мы отмечаем возможность синтеза оптимального управления. Такая возможность позволяет упростить построение оптимального управления, сведя его к поточечной оптимизации. Второй мы отмечаем возможность решения тех задач оптимального управления, при которых необходимость использовать численные методы. В случае решения задач оптимального управления колебаниями струны важным является построение разностного аналога энергии струны. Это квадратичный функционал, не меняющийся при отсутствии управляющего воздействия на струну. Полное решение этих проблем требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Понtryгин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкrelidze Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1976.
2. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
3. Латтес Р., Лионс Ж.-Л. Метод квазиобращения и его приложения. – М.: Мир, 1970.
4. Ильин В.А., Моисеев Е.И. Оптимизация граничных управлений колебаниями струны // УМН. – 2005. – Т. 60, №. 6. – С. 89-114.
5. Моисеев Е.И., Фролов А.А. Граничное управление процессом колебаний струны при условии сопротивления среды на правом конце за время, меньшее критического // Дифференциальные уравнения. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 555-566.
6. Ладыженская О.А. Краевые задачи математической физики. – М.: Наука, 1973. – 407 с.
7. Ладыженская О.А. Смешанная задача для гиперболических уравнений. – М.: Гостехиздат, 1953. – 282 с.
8. Соболев С.Л. Некоторые применения функционального анализа в математической физике. – М.: Наука, 1988. – 336 с.
9. Клово А.Г., Гончаров А.В. Условия всюду-оптимальности управления одной системой с распределенными параметрами // Материалы IV Международной научной конференции «Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» (Донецк, 2019). Т. 1 Физико-математические и технические науки. Ч. 1. – Донецк: ДонНУ, 2019. – С. 27-30.
10. Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А. Математическая задача об оптимальном управлении струной // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 178-191.
11. Клово А.Г., Куповых Г.В., Гончаров А.В. Численные методы в задачах управления // Материалы IV Международной научной конференции «Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности». Т. 1 Физико-математические и технические науки. Ч. 1. – Донецк: ДонНУ, 2021. – С 61-64.
12. Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А. О возможности синтеза оптимального управления колебаниями струны // Международная научная конференция по дифференциальным уравнениям и динамическим системам: Тезисы докладов. – Владимир: Изд-во ВлГУ 2020. – 163 с. – С. 72-73.
13. Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А., Гончаров А.В. Пример построение всюду-оптимального управления колебаниями струны в явном виде // Материалы IV Международной научной конференции «Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности». Т. 1 Физико-математические и технические науки. Ч. 1. – Донецк: ДонНУ, 2020. – С. 32-36.
14. Куповых Г.В., Клово А.Г. Некоторые математические вопросы для задач оптимального управления // X Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сб. научных трудов. – Ростов-на-Дону-Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – С. 79-85.
15. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971.
16. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983.

Оценка мощности глобального грозового генератора

Тимошенко Дмитрий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
dmitrytim@sedu.ru

Куповых Геннадий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kupovukh@sedu.ru

Белоусова Ольга Васильевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
obelousova@sedu.ru

Кудринская Татьяна Владимировна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
tvkudrinskaya@sedu.ru

Аннотация. В рамках теории электродного эффекта в приземном слое атмосферы исследована зависимость структуры электрического поля от действия глобального грозового генератора. В качестве математической модели рассматривается начально-краевая задача, задаваемая уравнением полного тока, описывающим поведение напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы как результат действия совокупности локальных и глобальных факторов. Основное внимание удалено исследованию влияния на электрическое поле плотности тока как фактора, демонстрирующего изменение потенциала ионосферы.

Abstract. Within the framework of the theory of the electrode effect in the surface layer of the atmosphere, the dependence of the structure of the electric field on the action of a global thunderstorm generator was studied. As a mathematical model, we consider an initial boundary value problem specified by the total current equation, which describes the behavior of the electric field strength in the surface layer of the atmosphere as a result of the action of a set of local and global factors. The main attention is paid to the study of the influence of current density on the electric field as a factor demonstrating a change in the ionospheric potential.

Ключевые слова: электродный эффект, приземный слой атмосферы, мощность источника

Keywords: electrode effect, surface layer of the atmosphere, source power

I. ВВЕДЕНИЕ

Суточный ход напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы под действием глобального грозового генератора, даёт возможность решения задач оценки его мощности, используя параметр плотности мощности источника:

$$S = j \cdot E. \quad (1)$$

II. МОДЕЛЬ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Зависимость структуры электрического поля от действия глобального грозового генератора в случае турбулентного приближения исследовалась в работах [1, 2].

Воздействие глобального генератора на напряженность поля приземного слоя описывалось при помощи уравнения полного тока:

$$\frac{\partial E}{\partial t} - D_0 \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + 4\pi\lambda E = 4\pi j(t). \quad (2)$$

Соответствующие начальные и граничные условия имеют вид:

$$E|_{t=0} = E_0, \quad E|_{z=0} = E_0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=L} = 0, \quad (3)$$

где E_0 – напряженность электрического поля на бесконечно малом удалении от поверхности Земли, $L = 10$ м – толщина турбулентного электродного слоя, $D(t,z)$ – коэффициент турбулентной диффузии; λ – электрическая проводимость атмосферы; $j(t)$ – плотность полного тока в приземном слое; z_0 – параметр шероховатости.

Отметим, что, хотя формально коэффициент турбулентной диффузии в уравнении (2) принимается постоянным, фактически фиксированное значение D_0 можно рассматривать только на заданной высоте в пределах электродного слоя, и для различных высот принимать различные D_0 , имея в виду высотную зависимость коэффициента турбулентной диффузии в общем случае турбулентного приближения [3–5]. Такой подход, с одной стороны позволяет учесть высотную динамику коэффициента турбулентной диффузии, а с другой – оценить преимущественное влияние на поле именно глобальной унитарной вариации. Данный подход лежит в основе дальнейших исследований предлагаемой работы.

Координатный дифференциальный оператор начально – краевой задачи (2)–(3) является оператором Штурма – Лиувилля [6], что позволяет построить полную ортонормированную систему его собственных функций и решить задачу (2)–(3) методом Фурье [9]. Соответствующие решения получены и исследованы в работах [1, 2].

С целью исследования влияния глобальной вариации потенциала ионосферы, вызванной суточными колебаниями мощности грозового генератора, правая часть уравнения (2), выражающая полный ток в приземном слое, задавалась в виде гармонической функции времени [1]:

$$j(t) = j_0(1 - \alpha \sin(\omega t)) \quad (4)$$

Соотношение (4) имеет минимум в 06^h UT и максимум в 18^h UT с амплитудами 20% от среднего значения при значении параметра $\alpha=0,2$, что приближенно согласуется с унитарной вариацией [1]. При описанных предположениях суточный ход напряженности электрического поля приземного слоя описывается соотношением

$$E(t) = E_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{32}{(2n-1)L} \left(-\frac{0,2j_0(\sin(\omega t)(D\mu_n + 4\pi\lambda) - \omega \cos(\omega t) + \omega e^{-(D\mu_n + 4\pi\lambda)t})}{(D\mu_n + 4\pi\lambda)^2 + \omega^2} \right) \right) \right] \sin \frac{\pi(2n-1)}{2L} z \quad (5)$$

Зная закономерности для суточного хода плотности полного тока (4) и напряженности электрического поля (5), можно получить суточные изменения параметра плотности мощности грозового генератора путем непосредственного подсчета величины (1) как произведения величин напряженности поля и плотности тока. Пример такой оценки приведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ГЛОБАЛЬНОГО ГРОЗОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Параметр/время, ч.	0	6	12	18	24
E, В/м	95	83	103	127	97
j, пА/м ²	3	3	5	7	3
S, Вт/м ³	291	249	315	889	291

Из табл. 1 видно, что минимальные и максимальные значения мощности глобального грозового генератора по времени совпадают с утренним минимумом и вечер-

ним максимумом глобальной унитарной вариации потенциала ионосферы, таким образом, теоретические результаты моделирования согласуются с результатами много летних измерений.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен теоретический подход к оценке мощности глобального грозового токового генератора исходя из структуры суточных вариаций напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы. Полученные авторами в предшествующих работах закономерности суточных вариаций поля в приземном слое в приближении турбулентного электродного эффекта для квазистационарного коэффициента турбулентной диффузии позволяют оценить мощность глобального грозового генератора по значениям напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

- Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 452-461.
- Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Клово А.Г., Кудринская Т.В. Влияние электродного эффекта на суточные вариации электрического поля атмосферы в приземном слое // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – 36, № 10. – С. 834-838.
- Морозов В.Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя: монография. – СПб.: Астерион, 2017. – 307 с.
- Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с.
- Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 114 с.
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 6-е издание. – М.: Наука 1999. – 736 с.

Управление конформациями молекул ДНК с помощью геометрических и физических параметров

Илюхин Александр Алексеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
aleilyukhin@yandex.ru

Тимошенко Дмитрий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
agklovo@sfedu.ru

Аннотация. Рассматривается концептуальный подход к задаче управления пространственными конфигурациями молекул ДНК. Работа носит проблемный характер и является обобщением исследований авторов в области моделирования поведения и структуры ДНК методами механики деформируемого твердого тела. Предметом исследований в настоящей работе служит вопрос о применимости методов теории управления к объекту живой природы на примере молекулы ДНК. В работе рассматриваются как вопросы управляемости на примерах влияния параметров молекулы на ее конфигурацию, так и вопросы наблюдаемости и идентификации параметров молекулы, исходя из видимой конфигурации в естественной среде. Приводится краткий обзор результатов авторов в части адаптации к объектам исследования существующих и разработке новых математических моделей деформируемых упругих объектов с учетом их внутренней структуры. В основу предлагаемого подхода положена концепция перехода с помощью известных методов молекулярной динамики от многоэлементной дискретной среды к континууму, содержащему моментные напряжения. Необходимость выбора в качестве базовой модели континуума, содержащего моментные напряжения, диктуется особенностями основного объекта исследования – молекул нукleinовых кислот и биополимеров – обладающих несколькими степенями свободы вращательных движений.

Abstract. A conceptual approach to the problem of managing spatial configurations of DNA molecules is considered. The work is problematic in nature and is a synthesis of the authors' research in the field of modeling the behavior and structure of DNA by the methods of the mechanics of a deformable solid. The subject of research in this paper is the question of the applicability of methods of control theory to a living object by the example of a DNA molecule. The paper considers both issues of controllability on examples of the influence of the parameters of a molecule on its configuration, and questions of observability and identification of parameters of a molecule, based on the visible configuration in the natural environment. A brief review of the authors' results in terms of adaptation to the objects of research of existing and development of new mathematical models of deformable elastic objects with regard to their internal structure is given. The proposed approach is based on the concept of transition using known methods of molecular dynamics from a multi-element discrete medium to a continuum containing momentary stresses.

Ключевые слова: управление конформациями ДНК, упругий стержень, идентификация параметров динамических систем.

Keywords: DNA conformation control, elastic rod, identification of parameters of dynamic systems.

I. ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается общая постановка и методология решения задачи управления пространственными конфигурациями макромолекул биологического происхождения, в первую очередь молекулами ДНК.

Получение заданной пространственной конфигурации (или, в терминах молекулярной динамики, конформации) молекулы ДНК имеет исключительное значение в таких областях как генная терапия и клеточная медицина. Это связано с тем, что одним из объективных и общепризнанных свойств молекулы ДНК, отвечающих за передачу наследственной информации, является последовательность и периодичность в молекуле ее базовых элементов – нуклеотидных оснований, – а также структурный состав этих элементов.

II. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

В связи с тем, что изменение конформаций молекулы приводит к изменению взаимного положения частиц молекулы, а, следовательно, к появлению новых близкодействующих участков и возможному исчезновению подобных участков, имевших место в прежней конформации, можно говорить о новых свойствах молекулы как следствии изменившегося электромагнитного поля, определяемого конфигурацией составляющих.

Таковы в общих чертах физические процессы, связанные с изменением конформации ДНК. Эти процессы, в свою очередь, лежат в основе передачи генетической информации и регулирования биохимических процессов внутри клетки

Описанные процессы показывают необходимость исследования конформаций молекулы, о чем свидетельствуют многочисленные работы, лишь малая часть которых приведена в списке источников [1–8].

Другой важной задачей является определение зависимости от конформаций внутренних параметров молекулы [9–11]. Влияние изменений значений параметров молекулы на конкретный вид ее конформации дает возможность через эти параметры влиять на конформации, устанавливать определенный их вид с соответствующими свойствами молекулы.

В то же время описанный процесс изменения электромагнитных характеристик молекулы в зависимости от изменения ее пространственной конфигурации наводит на мысль об использовании этого естественного процесса в качестве канала управления конформацией молекулы. Механизм управляющего воздействия представляется достаточно тривиальным: генерация электромагнитных полей заданных характеристик в пространственной окрестности, окружающей молекулу, что вызовет изменение электронного баланса внутримолекулярных структур, в свою очередь приводящее к изменению пространственной конфигурации молекулы в целом.

В отличие от традиционно рассматриваемых в теории управления технических систем, ДНК является объектом живой природы. Поэтому в первую очередь необходимо предложить обоснованную парадигму исследования, в рамках которой можно было бы построить математическую модель макромолекулы как объекта управления и указать соответствующие управляющие параметры.

В качестве такой парадигмы предлагается теория упругости, и соответственно в качестве модели объекта рассматривается модель деформируемого упругого тела.

Предварительным соображением, говорящим в пользу этого подхода, является распространение практики проведения компьютерного моделирования отдельных молекул и их систем не в рамках аппарата квантовой механики, наиболее полно описывающей строение вещества, а используя набор допущений и приближений, упрощающих природу процесса, но позволяющих решить задачу в целом.

Одним из ключевых допущений подобного рода является гипотеза о представимости молекулы в виде упругого тела, которое может быть подвергнуто сосредоточенным либо распределенным силовым воздействиям. В настоящей работе авторами взято за основу представление молекулы в качестве одномерного объекта – упругого стержня, что позволяет применить результаты предыдущих работ авторов [12–16] в области моделирования молекулярных систем методами теории упругости к задаче управления конфигурациями молекул.

Впервые данный подход был предложен в работах Д. Хёрста и Р. Бенхема [2, 3], которые рассматривали молекулу ДНК в виде упругого стержня, равновесные состояния которого описываются классической системой уравнений Кирхгофа-Клебша. И хотя такой подход, на первый взгляд, содержит заметную долю примитивизма, на практике он обладает потенциалом существенно продвинуться в решении задач молекулярного дизайна и, в частности, в области конформационного анализа. Это связано с тем, что слабостью утвердившихся в настоящее время в молекулярном дизайне методов (например, метод эмпирических силовых полей, метод молекулярной динамики или метод Монте-Карло) является то, что практически всегда уравнения, осуществляющие переход от молекулярных параметров к свойствам вещества то есть к макроскопическим свойствам, приходится решать численно. Таким образом, эффективность решения задач в значительной мере определяется вычислительными ресурсами, которыми располагают исследователи. Кроме того, моделирующие системы содержат большое количество основных уравнений и вспомогательных соотношений, поскольку исследуемые молекулы имеют сложное атомное строение. В то же время, представление исследуемых молекул в виде упругих поверхностей или одномерных упругих объектов (упругих стержней) позволяет с одной стороны уйти от перечисленных трудностей, а с другой – получить исчерпывающие представления как о процессах во внутренней структуре молекул, так и об их пространственной конфигурации и их взаимосвязи. В то же время, подход, предложенный Д. Хёрстом и Р. Бенхемом для описания поведения молекул, обладает рядом принципиальных недос-

татков, связанных с тем, что модель Кирхгофа-Клебша, описывающая деформации упругого стержня, основана на представлениях о симметричности тензоров напряжений и деформаций, возникающих в упругом теле под действием внешних воздействий. Такая гипотеза не отражает процессы, происходящие в естественных молекулярных системах, является слишком упрощенной, поскольку модель Кирхгофа-Клебша основывается на классической теории упругости. По этой причине Д. Хёрст и Р. Бенхем в своих работах не продвинулись дальше формальных постановок задач описания поведения молекулы ДНК в целом уравнениями Кирхгофа-Клебша.

Авторам данной работы удалось устранить указанные недостатки, используя модели сплошных сред, каждая из которых позволяет учесть определенный вид внутренних взаимодействий или начального состояния молекулы как объекта управления и соответствующим образом скорректировать систему уравнений модели [16, 18, 19].

В то же время, в [17] в нелинейной постановке был разработан общий метод определения пространственных форм равновесия деформируемых стержней. В работах [16, 18] осуществлена редукция от трехмерной задачи теории упругости к системе двумерной и одномерной задач, и одномерная задача взята в качестве модели, описывающей процесс деформации объекта. Это позволяет рассмотреть задачу управления пространственными формами равновесия как задачу управления системой с сосредоточенными параметрами.

Особенностью метода анализа форм равновесия, разработанного в [17], является возможность установить все допустимые формы устойчивого равновесия объекта, соответствующие определенному классу воздействий. Воздействия, в свою очередь, можно охарактеризовать соответствующим решением системы уравнений объекта (в нашем случае системы уравнений Кирхгофа-Клебша, скорректированной в соответствии с выбором модели сплошной среды). Отдельное преимущество рассматриваемого подхода состоит в том, что нет необходимости интегрировать уравнения объекта, поскольку, как показано в [16, 18, 19], известные решения с соответствующими уточнениями могут обобщаться для скорректированных уравнений.

Сказанное в первую очередь относится к точным решениям системы уравнений деформации. Однако именно точные решения являются ключевым инструментом классификации естественных форм равновесия исследуемых объектов, или, говоря языком техники, допустимых режимов функционирования системы.

Для целей определения конфигурации точные решения обладают большим преимуществом, поскольку они содержат много параметров – то есть потенциально много типов возможных взаимодействий внутри молекул, которые определяют упругие свойства молекул и их конформации в зависимости от разного класса действующих сил.

Параметры, входящие в конкретное точное решение, являются безразмерными, поэтому определяют классы допустимых форм равновесия лишь на качественном уровне. По сути, множество допустимых для существования данного решения значений параметров задает в пространстве состояний системы гиперповерхность, каждая точка которой соответствует устойчивой форме равновесия.

III. Выводы

Для оценки характеристик направленных воздействий, переводящих молекулу в желаемую форму равновесия, необходим переход к размерным значениям параметров, позволяющих соотносить характеристики внешних воздействий с изменениями внутренних состояний молекулярной системы.

В рамках рассматриваемой идеи направленного воздействия на структуру электромагнитных полей внутри молекулы переход к размерным параметрам означает, например, что в качестве критериев оптимизации управляющих воздействий можно выбрать напряженности электрического и магнитного полей или потенциал электрического поля.

Переход к размерным параметрам математической модели также необходим при решении задач, связанных с идентификацией физических параметров молекулы. Выявление связи конформации – параметры позволит более полно ответить на вопросы о связи между формой ДНК и ее функциями в молекулярном комплексе клеточного ядра. Анализ связи параметры – конформация позволит решить задачу управления конформацией через воздействия на внутренние параметры молекулы внешними факторами, например, электромагнитными полями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Франк-Каменецкий М.Д., Веденов А.А., Дыхне А.М. Переход спираль – клубок в ДНК // УФН. – 1971. – Т. 105. – Вып. 3 . – С. 479-519.
2. Benham C.J. Elastic model of supercoiling // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1977. – 74. – P. 2397-2401.
3. Hearst J.S. Torsional rigidity of DNA and length dependence of the free energy of DNA supercoiling // J. Mol. Biol. – 1984. – 173. – P. 75-91.
4. Hunter C.A. Sequence-dependent DNA Structure: The Role of Base Stacking Interactions // J. Mol. Biol. – 1993. – № 230. – P. 1025-1054.
5. Frank-Kamenetskii M.D., Lukashin A.V., Anshelevich V.V. Torsional and bending rigidity of the double helix from data on small DNA rings // J. Biomol. Struct. Dynam. – 1985. – 2. – P. 1005-1012.
6. Swigon D. Configurations with self-contact in the theory of the elastic rod model for DNA – Rutgers University, New Brunswick, 1999. – 255 p.
7. Bouchiat C., Mezard M. Elasticity model of supercoiled DNA molecule // Phys. Rev. Lett. – 1998. – 80. – P. 1556-1559.
8. Козлов Н.Н., Кугушев Е.И., Сабитов Д.И., Старостин Е.Л. Компьютерный анализ процессов структурообразования нуклеиновых кислот // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 2002. – № 19. – № 42.
9. Hunter C.A. Sequence-dependent DNA Structure: The Role of Base Stacking Interactions// J. Mol. Biol. – 1993. – №. 230. – P. 1025-1054.
10. Olson W.K., Gorin A.A., Lu X.-J., Hock L.M. DNA sequence-dependent deformability deduced from protein–DNA crystal complexes // Proc. Natl Acad. Sci. USA. – 1998. – No. 95. – P. 11163-11168.
11. Strick T.R., Croquette V. Homologous Pairing in Stretched Supercoiled DNA // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1998. – No. 95. – P. 10579-10583.
12. Илюхин А.А., Щепин Н.Н. К моментной теории упругих стержней // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2001. – Специ выпуск. – С. 92-94.
13. Илюхин А.А., Тимошенко Д.В. Математический анализ условий замкнутости молекул ДНК // Материалы Международной XI научно-технической конференции «Математические модели физических процессов». – Таганрог, 2005. – С. 135-143.
14. Илюхин А.А., Тимошенко Д.В. Новый метод определения условий замкнутости молекул ДНК // Обозрение прикладной и промышленной математики. – М., 2006. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 322-324.
15. Илюхин А.А., Тимошенко Д.В. Математическая модель замкнутых молекул ДНК // Известия Саратовского университета. – Саратов, 2008. – Т. 8. – Сер. Математика. Механика. Информатика. – Вып. 3. – С. 32-40.
16. Илюхин А.А., Тимошенко Д.В. Микрополярная теория упругих стержней. Известия Саратовского университета. – Саратов, 2008. – Т. 8. Сер. Математика. Механика. Информатика. – Вып. 4. – С. 27-39.
17. Илюхин А.А. Пространственные задачи нелинейной теории упругих стержней. – Киев: Наукова думка, 1979. – 216 с.
18. Илюхин А.А., Тимошенко Д.В. К одномерной микрополярной теории упругих стержней // Труды IV Всероссийской школы-семинара «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете». – Ростов-на-Дону, 2008. – С. 49-57.
19. Илюхин А.А., Тимошенко Д.В. Точное решение системы уравнений Кирхгофа для естественно закрученного стержня с равными жесткостями на изгиб. // Труды XI Международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды». – Ростов-на-Дону. – 2007. – С. 144-147.

Математическая модель распределения власти на примере г. Таганрога

Бугаева Ирина Артуровна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ialyapinova@sedu.ru

Никитина Алла Валерьевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
avnikitina@sedu.ru

Аннотация. Государственное управление – это практическое осуществление соответствующих процедурных управленческих решений государственными органами и их должностными лицами. В ходе рутинного процесса принятия решений государственный служащий всегда хотел бы знать, в какой степени результат его управленческой деятельности соответствует его ожиданиям. Правильные выводы о результатах управленческой деятельности можно сделать только на основе формально-аксиоматического метода. Авторами исследования проводится анализ современных подходов к моделированию иерархии власти и разработка математической модели динамики распределения иерархии власти на примере городской структуры управления власти.

Abstract. Public administration is the practical implementation of relevant procedural management decisions by government agencies and their officials. During the routine decision-making process, a civil servant would always like to know to what extent the result of his management activity meets his expectations. Correct conclusions about the results of management activity can only be made on the basis of the formal-axiomatic method. The authors of the study analyze modern approaches to modeling the hierarchy of power and develop a mathematical model of the dynamics of the distribution of the hierarchy of power using the example of the city government structure.

Ключевые слова: математическое моделирование, иерархические системы, структуры управления, власть.

Keywords: mathematical modeling, hierarchical systems, management structures, power.

I. ВВЕДЕНИЕ

Управление регионом, как и любой другой вид управления, основывается на результатах моделирования процессов социально-экономического развития данного региона в рамках выбранной концепции управления.

Важный элемент любой организации – её структура, которая предполагает механизм функционирования и зарождения организаций. Фактором успешного функционирования организаций, предприятия или фирмы – является грамотный выбор организационной структуры [9–15, 28–30]. И здесь также не обходится без оптимально организованной иерархии власти.

На сегодняшний день, актуальность поставленной проблемы усиливается в российской экономике, ее сферах, уровнях, в условиях постоянно изменяющихся процессов, применение в практике управления жестких ор-

ганизационных структур, превалирующих до недавнего времени управления, стало не эффективным и невозможным в применении их в дальнейшем. Следовательно, возникла проблема необходимости становления нового типа структур управления, с одной стороны, позволяющих решить проблему сочетания динамики, а с другой, сохранения управляемости политики и экономики. Так же возросла необходимость исследований в сфере появления организационных структур анализа качества и динамики управления.

Анализ существующих моделей динамики распространения власти в иерархических структурах показал, что большинство основаны на древовидной иерархии и моделях А.П. Михайлова. При этом данное направление моделирования всё ещё мало развито.

Проблема поиска оптимальных конструкций властных иерархий может быть решена с помощью методов математического моделирования, использование которых позволяет помимо определения самой конструкции иерархии оценить ряд последствий, возникающих при «модернизации» властной системы. Кроме изучения уже классических моделей Михайлова динамики распределения власти в иерархии особый интерес представляют модификации моделей для небольших местных систем управления – городских, муниципальных и поселковых. Однако для этого нужно подробно рассмотреть и изучить механизмы распределения власти на разных уровнях иерархий.

Термин «иерархическая структура» имеет широкое распространение. Однако следует различать иерархию в государственных структурах власти и иерархию в экономических системах – предприятиях, проектных командах и т.п. Слово «иерархическая» подчеркивает, что внутри структуры заранее и четко определен порядок подчиненности. Каждое ее звено (кроме высшего) имеет старшие, «приказывающие» инстанции и (за исключением низшего звена) младшие инстанции, выполняющие «приказы» исходящие как от данной инстанции, так и от других старших звеньев. Разумеется, что приказы идут только от старших к младшим. Очевидно, что члены гражданского общества не могут «приказывать» от имени государства ни друг другу, ни каким-либо звеньям властной структуры. В то же время любая инстанция имеет такую возможность по отношению к определенной части гражданского общества, а некоторые – по отноше-

нию ко всему обществу. Однако имеет место и реакция общества [10]. Для любой конкретной и достаточно протяженной иерархической структуры определить расположение всех составляющих ее инстанций в порядке подчиненности - очень сложная и трудоемкая задача.

II. МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАСТИ

У современных западных исследователей модели иерархии власти носят дискретный характер и опираются на «принципы демократии» и социальный выбор общества (Otto A. Davis, Melvin J. Hinich, J.L. Bernd, ed.).

В нашей стране одним из первых ученых, занявшимся математическим моделированием распределения власти в государственных иерархиях стал А.П. Михайлов. Он первый предложил математическую макромодель, описывающую пространственную и временную динамику распределения власти в иерархических структурах, формализовав понятие «системы правового общества». Не существует ни общих математических моделей систем «власть-общество», ни более частных моделей конкретных властных структур. Им глубоко осмыслен на философском уровне ряд актуальных политических макропроцессов, даны их хорошо структурированные описания, буквально «взывающие» к применению методологии математического моделирования в этой сфере.

Существенный вклад в развитие данного направления внесли Д.Ф. Ланкин, А.П. Петров, Е.А. Горбатиков, Бухарин С.Н., Малков С.Ю., О.Г. Прончева, М.Г. Дмитриев, Г.С. Жукова и др. [9–27].

Одними из самых известных математических моделей, описывающих влияние власти, являются модели информационного противоборства. Предполагает, что в социуме присутствуют два источника информации. Они являются антагонистическими в том плане, что индивид, ставший адептом одной «партии», становится в то же время невосприимчив к информации другой «партии». Рассматривается группа взаимодействующих индивидов, имеющая численность N_0 . В рамках рассматриваемой модели предполагается, что не охваченный информацией индивид может получить ее либо от СМИ, либо путем межличностной коммуникации от информированного ранее индивида (адепта). Численность адептов, поддерживающих первый источник информации, в момент времени t обозначим через $X(t)$, поддерживающих второй источник – через $Y(t)$. Интенсивность распространения информации этими способами описывается положительными параметрами α_1 и β_1 соответственно, причем эти параметры полагаются не зависящими от времени. Заметим, что интенсивность распространения информации через межличностную коммуникацию при этом пропорциональна также числу уже охваченных этим источником информации индивидов. Предполагается, что скорость распространения информации (то есть число охваченных индивидов за единицу времени), складывается из скоростей распространения информации каждого из вышеупомянутых способов. Эта скорость пропорциональна числу еще не охваченных индивидов, то есть $N_0 - X(t) - Y(t)$. Заметим, применительно к распространению информации через СМИ каналу здесь предполагается, что социум находится в своего рода «всеобъемлющем нелокальном информационном поле», т.е. любой из еще не завербованных членов общности

всегда имеет возможность получить распространяемую информацию и её воспринять. Практика показывает, что информационное воздействие является результативным, если оно является не одноразовым, а проводится в виде кампании.

Относительно «свежей» является системно-динамическая модель (СДМ) перераспределения власти между несколькими субъектами. На основе СДМ сложилась глобальная индустрия аналитики и поддержки принятия решений в государственном и корпоративном секторах. В СДМ система представляется в виде набора резервуаров (уровней, запасов), соединенных потоками. Пропускная способность потоков, наполняющих или опустошающих резервуары, регулируется некоторыми механизмами, которые, в свою очередь, зависят от поведения разнообразных факторов и/или акторов. Как и любая системно-динамическая модель, эта модель отображается как диаграмма запасов и потоков. Модель имитирует перераспределение власти между ключевыми субъектами, участвующими в политических процессах. Соответственно, субстанцией, которая перетекает из одного резервуара в другой, является власть (исчисленная в некоторых условных единицах). Причем власть в данном случае определяется как совокупность решеческих функций и поэтому является подвижной в том смысле, что может быть разделена и распределена между многими субъектами.

Модель, рассматриваемая в данном исследовании, основана на модели «Власть–Общество» А.П. Михайлова [9–15] и её модификациях (модель «Власть–Информация–Общество» и стохастическая модель политологической системы «Власть–Гражданское общество»).

Полагаем, что властные полномочия любой инстанции могут быть определены с помощью некоторого совокупного количественного критерия, включающего в себя номинальное (формальное) положение инстанции в структуре, объем находящихся в ее распоряжении людских, финансовых, материальных, информационных, интеллектуальных, законодательных, распорядительных и иных видов ресурсов, размер и местоположение контролируемой территории. В указанном понимании слово «власть» означает возможный уровень (степень, силу) влияния данного властного института на поведение других инстанций и на жизнь гражданского общества. Инстанции, имеющей большие властные полномочия, отводится, естественно, более высокое место (меньший номер) в иерархии по сравнению с инстанцией, имеющей меньшие полномочия. При этом для уяснения общих положений политологической модели достаточно принять властные полномочия высшей инстанции за единицу (или за 100%), тогда полномочия любой другой инстанции будут выражаться в долях (или процентах) по отношению к высшему институту.

Дальнейшее уточнение термина «властные полномочия» связано с такими понятиями как максимальные полномочия и минимальные полномочия. Первое описывает те действия, которые орган власти может выполнить максимально в некоторой ситуации в соответствии с законодательством. Другими словами, максимальные и минимальные полномочия задают законные верхние и нижние границы каждой инстанции. Для определения понятия уровня

властного влияния («величины» власти) вводится определение понятия «власть», которое тесно связано с фактически осуществляемым в данный момент данной инстанцией *уровнем властного влияния* (или *величиной власти*). Действительно, властные полномочия определяют лишь верхние и нижние законные границы уровня или величины власти (в этом смысле можно понимать известное выражение «объем властных полномочий»).

В математической модели фактически достигаемой власти отвечает неотрицательная функция $p(i,t)$, $0 < i < N$, зависящая от «пространственной» координаты i и времени t (обозначены «звездочками» на рисунке 1). Если для каких-то значений i , t выполняется $p(i,t) > p_2(i,t)$ (или $p(i,t) < p_1(i,t)$), то естественно говорить о «выходе» власти за рамки полномочий, или о *превышении (принижении) власти*. Принципиальная разница между функциями $p_1(i,t)$, $p_2(i,t)$ и функцией $p(i,t)$ состоит в том, что, в отличие от известных, заданных (пусть и в самом общем виде) властных полномочий $p_1(i,t)$ и $p_2(i,t)$, функция $p(i,t)$ – неизвестная, искомая величина, описывающая *текущее распределение власти в иерархической структуре*. Построение соответствующей математической модели и изучение пространственно-временной динамики именно для функции $p(i,t)$ (распределения власти) в зависимости от всех факторов, присутствующих в изучаемой системе, является основной задачей стохастической алгоритмизации.

Необходимо подчеркнуть, что понятие *реальное распределение власти* означает введение в модель следующего предположения 1: *все партнеры в системе «власть–общество» законопослушны, законы соблюдаются, налоги платятся, приказы выполняются* (в противном, случае функция $p(i,t)$ – величина власти – становится *весома неопределенной* или *вовсе теряет смысл*). Такой подход «от простого к сложному», т.е. построение модели для сильно идеализированной ситуации и дальнейшее ее усовершенствование, является типичным (а зачастую и единственным возможным) при математическом моделировании сложных объектов. Один из ключевых вопросов для описания взаимодействия в системе «иерархия–общество» – определение «величины» обмена властью между иерархической структурой и Конституцией (и, опосредованно, в итоге между иерархией и обществом). Вводится следующее предположение: *знак и величина обмена властью между иерархической структурой и Конституцией определяются реакцией системы*.

Под *реакцией системы* подразумевается суммарная реакция обоих партнеров (иерархии и общества) на текущее распределение $p(i,t)$ власти в структуре. Например, применительно к *реакции общества* имеется в виду, что если в данный момент времени оно выражает свое отрицание тех или иных действий данного звена иерархии (сопротивление), то это побуждает инстанцию уменьшить осуществляющую ею власть, как бы отложив про запас некоторое ее «количество» в конституционный резервуар (и уменьшить или вовсе избежать соответствующих отрицательных, с точки зрения общества, последствий). Подходящий пример – требования смягчить те или иные виды налогов. Положительная же реакция общества (т.е. его поддержка) побуждает инстанцию увеличить уровень реализуемой ею власти, взяв необходимые «ресурсы» из законодательства (пример –

требования усилить борьбу с преступностью). Качественный характер реакции общества связывается с доминирующим в нем типом сознания (правовое, анархическое, авторитарное, смешанное).

III. Общее описание иерархической структуры

Иерархическая структура состоит из $N+1$ инстанции (рис. 1), каждой из которых приписан номер i ($0 \leq i \leq N$). Высшая инстанция имеет номер 0, низшая – номер N . Стрелка (4) обозначает направление подчиненности в структуре – «сверху-вниз» (или «слева-направо»), то есть направление движения властных распоряжений (приказов), передаваемых по иерархической лестнице.

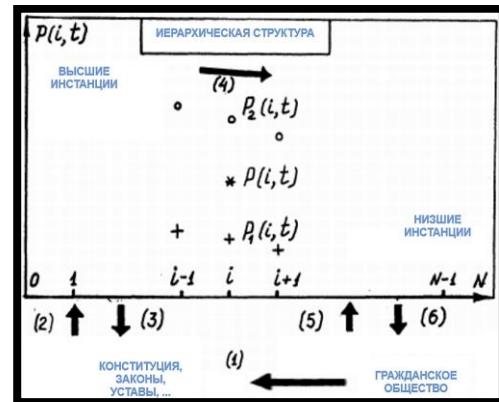


Рис. 1. Иерархическая структура

Заметим, что границы власти могут, как известно, определяться не только законодательством, но также традициями и системой прецедентов. Однако, для краткости, всюду дальше речь будет идти о законодательно установленных полномочиях [10, 13].

Иерархические структуры или системы состоят из элементов, каждый из которых должен функционировать определенным образом: принимать сигналы (команды) верхнего уровня и передавать их на нижний. Очевидно, что «средний» человек вполне может выполнять подобные функции передачи команд сверху вниз, то есть может быть «элементом» (звеном) иерархической системы. С точки зрения математического моделирования иерархическая структура описываемой задачи облегчает описание алгоритма, но усложняет математическое описание взаимодействий между структурами или уровнями иерархий. Иерархические структуры принято разделять на две основные группы – графовые древовидные и пирамидальные.

Внутри иерархии любая инстанция принимает к исполнению какие-то властные распоряжения, идущие от старших звеньев и, в свою очередь, передает какие-то приказы младшим звеньям. При этом происходит некоторое перераспределение власти между ступенями иерархии (напомним, что речь идет не о властных полномочиях, а о реально осуществляемом, «текущем» уровне власти – величине $p(i,t)$ главы 1) [1 – 6, 9–13].

Вводится следующий *Постулат*: внутри иерархии власть может передаваться только из места с большей властью в места с меньшей властью. Рассматриваются два главных механизма, ответственных за перераспределение власти внутри иерархии [9–13].

Рассмотрим механизм «Близкодействие». Условно говоря, этот механизм можно назвать передачей власти «по команде», когда начальник отдает властное распоряжение ближайшим подчиненным, которые также взаимодействуют только со своими непосредственными подчиненными. Данный механизм соответствует хорошо известной бюрократической процедуре (слово «бюрократический» и все другие понятия употребляются здесь без каких-либо эмоциональных оттенков, а как рабочий термин).

Пусть i -ая инстанция передала $i+1$ -ой инстанции некий приказ (например, поручила подготовить проект годового отчета о финансовой деятельности одного из подведомственных учреждений). Что произошло в таком «элементарном акте» взаимодействия между соседями по иерархии? Вместе с приказом подчиненный получил некоторую (пусть небольшую и пусть временно) порцию власти, дополнительную к той, которую он реально осуществлял в данный момент (например, для выполнения приказа ему разрешен доступ к финансовым документам). С другой стороны, i -ая инстанция утратила некоторую часть от своей текущей власти, переложив контроль за данным участком работы на $i+1$ -е звено.

Совокупность передаваемых распоряжений формирует своего рода «поток власти», идущий от i -ой к $i+1$ -ой инстанции. Определим поток власти $W(i,t)$ как количество власти, получаемое в единицу времени $i+1$ -й ступенью от i -й ступени [6, 9–13].

В соответствии со сформулированным выше постулатом величина $W(i,t)$ – положительна при $p(i,t) > p(i+1,t)$, отрицательна при $p(i,t) < p(i+1,t)$ и равна нулю при $p(i,t) = p(i+1,t)$.

Предлагается весьма общее математическое выражение для величины $W(i,t)$:

$$W(i,t) = -\chi [(p(i,t) - p(i+1,t))p(i,t)p(i+1,t)i,i+1,t] \cdot [p(i+1,t) - p(i,t)], \quad (1)$$

где функция $\chi > 0$ при всех значениях аргументов, от которых она зависит.

Формула (1) – конкретизация постулата применительно к рассматриваемому механизму близкодействия. Положительность функции χ обеспечивает нужный знак величины $W(i,t)$. В частности, если в какой-то момент времени t оказывается, что $p(i+1,t) > p(i,t)$, т.е. младшая инстанция имеет власть большую, чем старшая, то поток власти автоматически «работает» в сторону уменьшения разницы $p(i+1,t) - p(i,t)$, способствуя преодолению этой «ненормальной» ситуации (свидетельствующей о неблагополучии в данных звеньях иерархии).

Общность выражения (1) в том, что для потока власти предусмотрена, помимо зависимости от разницы $p(i,t) - p(i+1,t)$, также зависимость от всех введенных ранее величин – значений искомой функции $p(i+1,t)$, $p(i,t)$, координат i , $i+1$, времени t . Зависимость от t и i , $i+1$ означает также неявную зависимость от заданных властных полномочий p_1 , p_2 и реакции общества F (впрочем, эту зависимость нетрудно ввести и явным образом). Общность также и в том, что на все эти зависимости не накладывается никаких ограничений, кроме требования, чтобы при $p(i+1,t) = p(i,t)$ выполнялось $W(i,t) = 0$. Заметим, однако, что по формуле (1) поток власти определя-

ется только величинами, относящимися к непосредственно взаимодействующим, в данном случае соседним, инстанциям.

Функция χ имеет определенный «бюрократический» смысл, описывая «свойства» иерархической среды, некоторые аспекты взаимоотношений внутри иерархии. Пусть, к примеру, поток власти $W(i,t)$ и величина $p(i,t)$ фиксированы, а $\chi = \chi_0 = \text{const}$, т.е. функция χ не зависит от времени и других величин. Тогда по формуле (8) получаем, что с возрастанием χ_0 разница $p(i+1,t) - p(i,t)$ как абсолютно, так и относительно уменьшается. Можно сказать, что с ростом χ_0 уменьшается «властолюбие» (но и «ответственность») старшей инстанции, которая все более «терпимо» относится к выравниванию своей власти с властью младшего партнера. С уменьшением величины χ_0 ситуация, естественно, обратная [9–13].

Далее рассмотрим механизм «Дальнодействие». Образное описание этого механизма может быть дано известным выражением «команда через голову». Это означает, что i -ая инстанция отдает властные распоряжения звеньям с далекими номерами, минуя ближайших подчиненных. К такого рода действиям можно отнести, например, распоряжение о переходе вооруженных сил на летнюю форму одежды, для реализации которого, фактически, не требуется процедура передачи по команде – достаточно опубликовать соответствующий приказ для сведения (и исполнения) сразу всех военнослужащих.

Образующийся благодаря механизму дальнодействия поток власти (смысл тот же, что и в случае а)), получаемый $i+1$ -ой инстанцией от j -го звена, может быть выражен достаточно общей формулой

$$V(i+1,j,t) = \chi(p(i+1,t), p(j,t), i+1, j, t) \cdot [p(j,t) - p(i+1,t)], \quad (2)$$

где функция $\chi \geq 0$ неотрицательна в согласии с постулатом. По смыслу она близка к функции χ за теми отличиями, что во-первых, ею описывается взаимодействие не соседних, а удаленных друг от друга инстанций, т.е. $j \neq i+2, i$ и, во-вторых, величина χ может обращаться в нуль, т.е. предусмотрена возможность отсутствия команд через голову между какими-либо ступенями иерархии.

Также как и функция χ она зависит только от величин, относящихся к непосредственно взаимодействующим звеньям. Эти зависимости априори не подвергаются каким-либо ограничениям (требуется только, чтобы $V(i+1,j,t) = 0$ при $p(i+1,t) = p(j,t)$ и могут быть дополнены явной зависимостью от других введенных ранее величин.

Властные распоряжения, передаваемые от j -ой к $i+1$ -ой инстанции в нормальной ситуации (т.е. при $p(i,t) > p(i+1,t)$ или $p(j,t) > p(i+1,t)$, $j < i$) несут с собой, согласно постулату и его конкретизациям некоторую положительную порцию власти для $i+1$ -ой инстанции. Если же имеет место уже упоминавшийся не нормальный случай, когда $p(i,t) < p(i+1,t)$ или $p(j,t) < p(i+1,t)$, $j < i$, то по постулату некоторая доля власти переходит уже от младшего к старшему звену. Это предположение естественно и отвечает сути иерархической структуры (если, конечно, конкретный начальник не заблуждается относительно реального уровня своей власти по сравнению с реальной властью подчиненного). В то же время постулат, описывая ситуацию «младший не может получить порцию власти от старшего, если тот в данный момент

имеет меньшую (или равную) с ним реальную власть», не описывает внешне возможную ситуацию, когда «старший имеет власть большую, чем младший, но вдобавок еще и «отбирает» у младшего часть его власти», что противоречило бы постулату.

Однако, в реальности существует множество примеров, когда решения и поручения начальника могут быть выполнены без переноса ответственности на подчиненных. Например, в случае, когда начальник делегирует поручение напрямую исполнителям, минуя промежуточные звенья и иерархические уровни. Также существует практика самостоятельного принятия и реализации решений инициативными сотрудниками без непосредственного участия начальства. Таким образом, предложенный постулат не всегда применим в реальных условиях работы организации. Взаимодействие внутри иерархических структур может быть гораздо более сложным и гибким, чем предполагается в данной интерпретации.

Иное дело представляют собой более конкретные взаимоотношения между звеньями иерархии, которые могут напоминать обсужденную ранее ситуацию. Такие взаимоотношения могут быть описаны с помощью определенных ранее функций. Например, в условно названной паре «начальник – заместители начальника» глава может быть недоволен одним из своих заместителей по какой-то причине. В данном случае наиболее разумным шагом со стороны руководителя будет следующее:

- 1) сместить «физическое лицо», заменив его более подходящей фигуру;
- 2) направить поток властных распоряжений через других заместителей.

В этих двух случаях в иерархии в целом и в отвечающей ей модели, фактически, ничего не меняется кроме, быть может, персоналий. В частности, инстанция «заместители» как целое получает тот же поток власти.

В распоряжении начальника могут иметься и такие способы:

- 3) усилить роль команд через голову данного заместителя;
- 4) изменить его властные полномочия;
- 5) упразднить данную должность.

Случай 3) отвечает уменьшению величины α и увеличению величины χ , в случае 4) соответствующим образом изменяются функции p_1 и p_2 , в случае 5) уменьшается число звеньев в иерархии. Могут быть реализованы различные комбинации этих действий (в отношении всей «заместительской» власти) и т.д. Начальник, наоборот, очень доволен каким-то заместителем, тогда его действия естественно будут обратными. Таким образом, полностью описаны отношения в иерархии и различные изменения.

IV. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАСТИ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ НЕБОЛЬШОГО ГОРОДА

Отдельный интерес представляют провинциальные небольшие города, поскольку их большинство. Но они также различаются по структуре иерархии власти (на-

пример, старинный город-порт-крепость отличается от промышленного города советского периода основания). Рассмотрим организационную структуру городской администрации на примере г. Таганрога (рис. 2).



Рис. 2. Современное административное устройство г. Таганрог

Принято выделять шесть групп вопросов, которые входят в компетенцию любой местной администрации:

- 1) вопросы социально-экономического развития территории;
- 2) вопросы муниципального хозяйства;
- 3) финансовые вопросы;
- 4) социальные вопросы;
- 5) административно-организационные вопросы;
- 6) исполнение переданных государственных полномочий.

Указанные группы полномочий распределяются между отраслевыми и функциональными структурными подразделениями, в результате чего создается типичная линейно-функциональная структура местной администрации, которая обычно включает:

- 1) руководящее звено: главу администрации, заместителей главы, в числе которых может быть первый заместитель;
- 2) структурные подразделения, которые могут находиться в подчинении главы администрации, одного из его заместителей или в соподчинении между собой:
 - отраслевые структурные подразделения, ведающие отдельными отраслями муниципальной деятельности (жилищно-коммунальное хозяйство, образование, культура, здравоохранение, транспорт и т.п.);

- функциональные структурные подразделения, исполняющие одну или несколько функций во всех отраслях (экономическая служба, финансовый орган, орган по управлению муниципальным имуществом и др.);

3) территориальные органы (например, для города с районным делением);

4) аппарат администрации, обеспечивающий и организующий ее деятельность: юридическая, кадровая, информационная службы, делопроизводство, работа с обращениями граждан, собственная бухгалтерия и др.

Пять первых групп вопросов присутствуют во всех муниципальных образованиях независимо от типа. Шестая группа вопросов относится только к муниципальным районам и городским округам, которые вправе осуществлять отдельные государственные полномочия.

Подобные организационные структуры называют линейно-функциональными из-за основной ориентации в системе принятия решений на взаимодействие между отраслевыми (линейными) и функциональными структурными подразделениями. Первые являются, как правило, инициаторами принятия решений, а вторые исполняют функции экспертизы, согласования проектов решений.

В зависимости от роли и места в организационной структуре, важности и объема решаемых задач структурные подразделения обладают разным статусом и, соответственно, имеют разные наименования.

Легко убедиться, что для Таганрога характерна линейно-функциональная структура управления.

К недостаткам структуры относится то, что происходит расширение аппарата управления, его бюрократизация, увеличивается время принятия решений из-за необходимости согласований, сохраняется проблема координации функциональных служб. Линейно-функциональный тип структур особенно эффективен там, где аппарат управления выполняет повторяющиеся стандартные процедуры. Он создает благоприятную почву для формализации полномочий и ответственности, но не всегда обладает необходимой гибкостью при возникновении новых задач.

К местным органам власти относятся:

1) мэры (или главы) городов, районов, городских и сельских поселений; в городе Таганроге – председатель Городской Думы – глава города Таганрога;

2) представительные органы местного самоуправления; в городе Таганроге это Городская Дума города Таганрога, состоящая из 25-ти депутатов, избираемых по 25-ти муниципальным одномандатным избирательным округам;

3) исполнительные органы местного самоуправления; в Таганроге, в частности, к исполнительным органам относится Администрация города Таганрога.

Из приведенных ветвей власти таганрожцы участвуют в выборах:

1) президента РФ;

2) депутатов Государственной Думы Федерального собрания РФ;

3) депутатов Законодательного собрания Ростовской области;

4) депутатов Городской Думы города Таганрога.

На основе сказанного построим модель динамики распределения власти в иерархической структуре г. Таганрога. Структура состоит максимум из 9 инстанций (разветвление в глубину). Пусть $0 \leq i \leq 9$, где $i=0$ – номер высшей инстанции – главы администрации города. Будем полагать, что максимальные $p_2(i,t)$ и минимальные $p_1(i,t)$ властные полномочия, в отличие от структуры региона, например от времени не сильно, но зависят (в случае, когда $t=const$ модель станет стохастической), поскольку структурных изменений законодательства территориальное деление города в ближайшем будущем не ожидается; функция $p(i,t)$ или кратко p – неизвестная, искомая величина, описывающая текущее распределение власти в иерархической структуре.

Из «баланса» власти в инстанции [9, 10] получается основное уравнение модели для нахождения неизвестной функции $p(i,t)$ – распределения власти в иерархии. Оно представляет собой нелинейное эволюционное интегро-дифференциальное уравнение в частных производных вида

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \int_0^l \chi [p(x',t) - p(x,t)] dx' + F, \quad (3)$$

где непрерывный аргумент x – аналог дискретной координаты i , а величина l соответствует «длине» иерархии N . Поскольку общее число инстанций относительно велико ($N >> 1$) и отсутствуют «команды через голову» (по крайней мере такова внешняя картина в г. Таганрог), т.е. $\chi \equiv 0$, то уравнение перепишется в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial p}{\partial x} \right) + F, \quad 0 < x < l, t > t_0. \quad (4)$$

Здесь κ и F полагаем для простоты равными положительными постоянными. Решение (4) реализовано в системе вычислений *Wolframalpha* (<http://www.wolframalpha.com>) (рис. 3, 4).

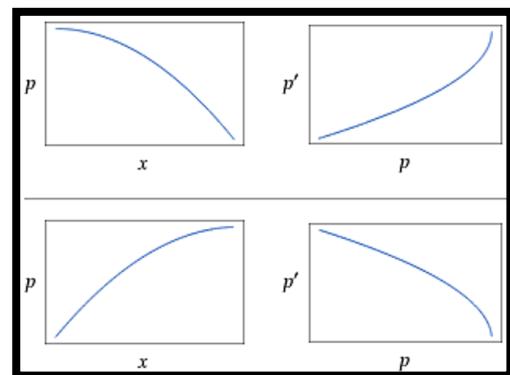


Рис. 3. Примеры графиков частных решений (27) при $p(0)=1$, $p'(0)=0$ (вверху) $p(0)=0$, $p'(0)=1$ (внизу)

На рис. 3 приведены графики частных решений задачи (4) с начальными условиями $p(0)=1$, $p'(0)=0$ (вверху) $p(0)=0$, $p'(0)=1$ (внизу). Левые графики (сверху и снизу) показывают динамику распределения власти в зависимости от динамики изменения инстанций; правые графики (сверху и снизу) показывают скорость изменения распределения власти.

Рис. 4 соответствует «идеальному» варианту распределения власти, когда гражданское общество F поддерживает власть и каждая инстанция ответственно выполняет свою работу (здесь мера ответственности – χ). В случае «безответственности» инстанций и соответствующей «безответственной» реакции общества – игнорирования инстанций – график будет аналогичен, поскольку закономерность сохраняется – семейство решений будет также «скатываться вниз», но уже в сторону анархии.

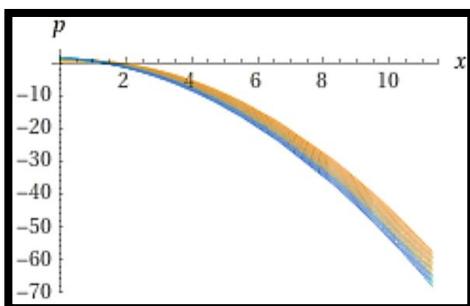


Рис. 4. Семейство решений (4) относительно $p(0)$ и $p'(0)$ при одинаковых значениях F и χ

Здесь упущен важный момент – чем больше инстанций власти, тем меньше ответственность у каждой из них – стоящий вверхуластной иерархии делится властью и ответственностью с нижестоящим – чем больше разрастается наш иерархический граф, тем больше значение χ в каждом его узле. Поскольку в г. Таганроге нет митингов и массовых протестов, то реакцию гражданского общества можно считать достаточно слабой и положительной.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модифицированная модель динамики распределения власти в иерархической структуре г. Таганрога в целом соответствует реальной картине и не противоречит изученным моделям распределения власти.

В разработанной модифицированной модели для г. Таганрога не учтено множество факторов. Например, если опираться на особенности города – технологичность, активное пользование СМИ, то за основу следует взять модель «Власть–Информация–Общество», где X – число сторонников правящей партии «Единая Россия» (68% – в городской Думе г. Таганрога на апрель 2024 г.), Y – оппозиции. Однако такая модель более «политологична» и не объективна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А.А. Современная прикладная математика и вычислительный эксперимент // Коммунист. – 1983. – № 18. – С. 31-42.
2. Самарский А.А. Неизбежность новой методологии // Коммунист. – 1989. – № 1. – С. 82-92.
3. Самарский А.А., Михайлов А.П. Компьютеры и жизнь (Математическое моделирование). – М.: Педагогика, 1987. – 127 с.
4. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование в информационную эпоху // Вестник РАН. – 2004. – Т. 74, № 9. – С. 781-784.
5. Самарский А.А., Михайлов А.П. Методологические основы моделирования социальных процессов: пределы возможного // Математическое моделирование социальных процессов / под ред. В.И. Добренькова, А.А. Самарского. – 2000.
6. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. – М.: Физматлит. 2006. – 320 с.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 735 с.
8. Васильев Н.И., Клоков Ю.А. Основы теории краевых задач обыкновенных дифференциальных уравнений. – Рига: Зиннатне, 1978. – 184с.
9. Михайлов А.П., Петров А.П. Поведенческие гипотезы и математическое моделирование в гуманитарных науках // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23, № 6. – С. 18-32.
10. Михайлов А.П. Математическое моделирование динамики распределения власти в иерархических структурах // Матем. моделирование. – 1994. – 6:6. – С. 108-138.
11. <http://www.mathnet.ru/links/b9b1b9c08de97b7266716dac9d1a73a0/m1882.pdf>.
12. Михайлов А.П. Моделирование эволюции распределения власти в государственных иерархиях // Журнал «Полития». Технология изучения политических и электоральных процессов.
13. [http://politeia.ru/files/articles/rus/Politeia-1996\(2\)-26-39.pdf](http://politeia.ru/files/articles/rus/Politeia-1996(2)-26-39.pdf).
14. Михайлов А.П., Маревцева Н.А. Модели информационной борьбы // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23, № 10. – С. 19-32.
15. Михайлов А.П. Моделирование системы "власть-общество". – М.: Физматлит, 2006. – 144 с. – ISBN 5-9221-0682-1. – Текст: электронный // ЭБС "Консультант студента". [сайт]. – URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922106821.html> (дата обращения: 06.05.2024). – Режим доступа: по подписке.
16. Дмитриев М.Г., Жукова Г.С., Петров А.П. Асимптотический анализ модели «Власть-Общество» для случая двух устойчивых распределений власти // Математическое моделирование. – 2004. – Т. 16, № 5. – С. 23-34.
17. Бутузов В.Ф., Неделько И.В. О глобальной области влияния устойчивых решений с внутренними слоями // Матем. сборник. – 2001. – Т. 192, № 5. – С. 13-52.
18. Прончева О.Г. Модель системы «Власть–Информация–Общество» // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2018. – № 11. – 15 с. – DOI: 10.20948/prepr-2018-11. – URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-11>.
19. Васильева А.Б., Бутузов В.Ф. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений. – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.
20. Васильева А.Б. Об устойчивости контрастных структур // Матем. моделирование. – 1991. – Т. 3, № 4. – С. 114-123.
21. Васильева А.Б., Петров А.П., Плотников А.А. К теории контрастных структур переменного типа // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1998. – Т. 38, № 9. – С. 1534-1543.
22. Жуков Д.С. Системно-динамическая модель перераспределения власти между несколькими субъектами // Инноватика и экспертиза: научные труды. – 2021. – № 2. – DOI: 10.35264/1996-2274-2021-2-52-57.
23. Маревцева Н.А., Михайлов А.П., Петров А.П., Прончева О.Г. Моделирование информационного нападения информационного противоборства в социуме // Проблемы моделирования социальных процессов: Россия и страны АТР: материалы Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. Владивосток, 11–13 ноября 2015 г.) / [отв. ред. И.Г. Кузина]. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2015. – 368 с. – С. 43-45. – ISBN 978-5-7444-3666-7.
24. Петров А.П., Маслов А.И., Цаплин Н.А. Моделирование выбора позиций индивидами при информационном противоборстве в социуме // Математическое моделирование. – 2015. – Т. 27, № 12. – С. 137-148.
25. Семин В.Г. Алгоритмизация политологической модели «Власть – гражданское общество» // Материалы международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий», Сочи, 2010. – С. 601.
26. Семин В.Г. Стохастическая модель потока власти политологической системы «Власть – гражданское общество» // Качество. Инновации. Образование. – 2014. – № 11 (114). – С. 61-65. – EDN TCULHF: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22701924_93277413.pdf.
27. Самойленко В.С., Федотова А.Ю., Кажарова И.А. Система оценки эффективной деятельности проектной команды // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, Таганрог, 10–15 апреля 2023 года. – Таганрог: ЮФУ, 2023. – С. 170-173. – EDN RANVLС.
28. Форрестер Дж. Мировая динамика. – М.: Наука, 1978. – 168 с.
29. Avula X.J.R. Mathematical Modelling // Encyclopedia of physical science and technology. – 1987. – Vol. 7. – P. 719-728. Academic Press.
30. Pool R. Research News - Is it real or is it Cray // Science. – 1989. – 244. – P. 1438-1440.

Решение задачи обтекания тела сложной геометрии, моделирующей несущую поверхность типового высокоскоростного летательного аппарата на системах с распределенной памятью

Семенистый Владимир Васильевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vlad60sem@gmail.com

Гамолина Ирина Эдуардовна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
iegamolina@sedu.ru

Аннотация. Проводится численное исследование высокоскоростных течений вдоль донной поверхности летательных аппаратов. Исходная задача аппроксимируется с помощью блочно-ленточных систем линейных уравнений с матричными коэффициентами. Данные системы решаются методами параллельного анализа с использованием параллельных алгоритмов для многопроцессорных структур. В работе рассматриваются алгоритм матричной прогонки (и ее параллельный вариант) и метод декомпозиции линейных рекуррентных соотношений (алгоритм Стоуна). Стационарное решение задачи находится в приближении уравнений Навье-Стокса в преобразованных координатах методом установления [1].

Abstract. A numerical study of high speed flows along the bottom surface of aircraft is being carried out. The original problem is approximated using block-band systems of linear equations with matrix coefficients. Such systems are solved using parallel analysis methods with the use of parallel algorithms for multiprocessor structures. The work considers the algorithm of matrix sweep (and its parallel version) and the method of decomposition of linear recurrence relations (Stone's algorithm). The stationary solution of the problem is found by approximating the Navier-Stokes equations in transformed coordinates using the method of establishment [1].

Ключевые слова: уравнение Навье-Стокса, системы с распределенной памятью, алгоритм Стоуна.

Keywords: navier-Stokes equation, distributed memory systems, Stone's algorithm.

I. ФИЗИЧЕСКАЯ ОБЛАСТЬ ЗАДАЧИ

Верхняя граница обтекаемого объекта состоит из об разующей тела (нижней несущей поверхностью) и верхней стенки канала воздухозаборника (рис. 1). Левая граница выбрана в невозмущенном потоке, а правая в следе за телом. Нижняя граница проходит через нижнюю стенку канала воздухозаборника.

Уравнение верхней границы запишем в виде

$$x_2(x_1) = \begin{cases} 1 - 0,057\sqrt{x_1}, & 0 \leq x_1 \leq 3, \\ -0,268x_1 + 1,705, & 3 \leq x_1 \leq 3,8, \\ -0,29x_1 + 1,79, & 3,8 \leq x_1 \leq 4,5, \\ -0,445x_1 + 2,49, & 4,5 \leq x_1 \leq 5, \\ 0,2634, & 5 \leq x_1 \leq 6, \\ 1,473x_1 - 8,576, & 6 \leq x_1 \leq 7,5 \end{cases}$$

Подобная геометрия объекта рассматривалась в работе [2].

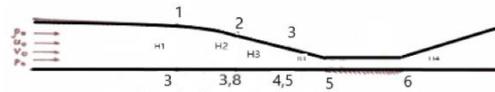


Рис. 1. Физическая область

После преобразования координат (для первой подобласти) получим следующие выражения

$$\begin{cases} q_1(x_1, x_2) = \frac{x_1}{3} \\ q_2(x_1, x_2) = \frac{x_2}{1 - 0,057\sqrt{x_1}} \end{cases}.$$

Таким образом физическая область преобразуется в расчетную математическую область (рис. 2).

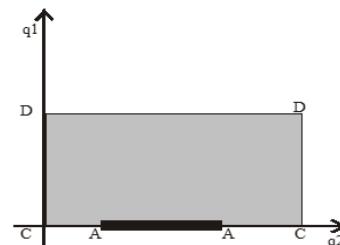


Рис.2. Расчетная область

Приведем фрагмент параллельной программы расчета сетки в физической области задачи:

```

from mpi4py import MPI
from numpy import empty
comm=MPI.COMM_WORLD
numprocs=comm.Get_size()
rank=comm.Get_rank()
import math
import time
start_time =time.time()
M=int(input())
N=int(input())
q1=1/M
q2=1/N
x1=[]
x2=[]
x3=[]
i=0
while i<= M:
    x=3*q1*i
    x1.append(x)
    i+=1
    print("x1",x1)
i=0
j=0
while i<=M and j<=N:
    x=(1-0.057*math.sqrt(3*q1*i))*j*q2
    x2.append(x)
    i+=1
    if i>M:
        i=0
        j+=1
    print("x2",x2)
for x1,x2 in zip(x1,x2):
    x3.append((x1,x2))
print("x3",x3)
end_time=time.time()
print("time execution=", (end_time-start_time),"sec")

```

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для исследования картины течения в физической области была выбрана полная система уравнений Навье-Стокса недивергентного вида, записываемая в преобразованных расщепленных операторах уравнением (1).

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{j=1}^2 B_j f = F. \quad (1)$$

Здесь искомый вектор газодинамических параметров обозначен как $f = (\rho, v_1, v_2, p)^\tau$; матричные операторы физических процессов обозначены как B_j [1].

Для численного расчета системы (1) используется схема с весами:

$$\frac{f^{n+1} - f^n}{\tau} + \sum B_{jh} (\alpha f^{n+1} + (1-\alpha) f^n) = F^n \quad (2).$$

Аппроксимация уравнений системы (1) после преобразований приводит к решению СЛАУ с блочно-трехдиагональными матрицами для уравнений баланса.

Так уравнение неразрывности (для противотоковой схемы) можно записать в виде [3]:

$$A\xi_\rho = F, \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} A_0 & B_1 & & \\ C_1 & A_1 & B_2 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & B_N \\ & C_N & A_N & \end{pmatrix}$$

$$\xi_\rho = (\bar{\xi}_{\rho,0}, \bar{\xi}_{\rho,1}, \dots, \bar{\xi}_{\rho,N}).$$

$$C_J = -\frac{\alpha\tau}{h_2} \begin{pmatrix} \frac{(v_2 + |v_2|)_{1j-1}}{2} & & & \\ & \frac{(v_2 + |v_2|)_{2j-1}}{2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{(v_2 + |v_2|)_{M-1j-1}}{2} \end{pmatrix}.$$

$$B_J = -\frac{\alpha\tau}{h_2} \begin{pmatrix} \frac{(v_2 - |v_2|)_{1j-1}}{2} & & & \\ & \frac{(v_2 - |v_2|)_{2j-1}}{2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{(v_2 - |v_2|)_{M-1j-1}}{2} \end{pmatrix}$$

Векторы

$$\bar{\xi}_{\rho,j} = ((\xi_\rho)_{1,j}, (\xi_\rho)_{2,j}, \dots, (\xi_\rho)_{M-1,j}), \quad 0 \leq j \leq N.$$

Рассмотрим параллельные методы решения системы (3). Вычисления проведем при следующих предположениях.

Краевые условия:

на правой границе – условия невозмущенного потока:

$$\rho = 1, \quad v_1 = \cos \alpha, \quad v_2 = \sin \alpha, \quad (\text{в работе } \alpha = 5^\circ).$$

На левой и нижней границе:

мягкие условия – решение $\frac{\partial^2 f}{\partial q_1^2} = 0$.

На верхней твердой границе:

условия прилипания для скоростей $v_1 = v_2 = 0$ и постоянства температуры $T = 4T_0$.

Плотность пересчитывается из уравнений состояния.

Начальные условия:

равенство решения параметрам невозмущенного потока.

III. МЕТОД МАТРИЧНОЙ ПРОГОНКИ

Для решения системы (3) рассмотрим метод матричной прогонки. Здесь

$\xi_{\rho,j}$ – неизвестные векторы размерности $M - 1$;

F_j – заданные векторы размерности $M - 1$;

A_J, B_J, C_J – квадратные матрицы порядка $M - 1$ соответственно.

По аналогии со скалярной прогонкой решение системы (3) будем искать в виде:

$$\xi_{\rho,j} = \alpha_j \xi_{\rho,j+1} + \beta_j, \quad j = N-1, \dots, 0, \quad (4)$$

где α_j – квадратные матрицы порядка M-1;

β_j – векторы размерности M-1.

Найдем коэффициенты прогонки:

$$\alpha_0 = -A_0^{-1} \cdot B_1,$$

$$\beta_0 = -A_0^{-1} \cdot F_0$$

$$\alpha_j = (-A_j - C_j \alpha_{j-1})^{-1} \cdot B_{j+1},$$

$$\beta_j = (-A_j - C_j \alpha_{j-1})^{-1} (F_j + C_j \beta_{j-1}), \quad j = 1, \dots, N.$$

На обратном ходе находится решение по формуле (4), учитывая, что $\xi_{\rho,N} = \beta_N$.

Структура коэффициентов трехдиагональной матрицы (уравнение (3)) зависит от знака скоростей.

Если предположить из физики процесса, что в первой расчетной подобласти нет возвратных течений, т.е. скорости положительные ($v_1 > 0, v_2 > 0$), тогда в этом случае коэффициенты упрощаются:

$$C_j = -\frac{\alpha\tau}{h_2} \begin{pmatrix} (v_2)_{1j-1} & & & \\ & (v_2)_{2j-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & (v_2)_{M-1j-1} \end{pmatrix},$$

$$B_j = 0.$$

$$A_j = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\alpha\tau}{h_1}(v_1)_{1j} + \frac{\alpha\tau}{h_1}(v_2)_{1j} & -\frac{\alpha\tau}{h_1}(v_1)_{1j} & & \\ 0 & 1 + \frac{\alpha\tau}{h_1}(v_1)_{2j} + \frac{\alpha\tau}{h_1}(v_2)_{2j} & -\frac{\alpha\tau}{h_1}(v_1)_{2j} & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 + \frac{\alpha\tau}{h_1}(v_1)_{M-1j} + \frac{\alpha\tau}{h_1}(v_2)_{M-1j} \end{pmatrix}$$

Система (3) становится двухдиагональной.

Тогда вектор невязок для плотности находится пересчетом по формулам:

$$\xi_{\rho,0} = A_0^{-1} \cdot F_0, \quad \xi_{\rho,j} = A_j^{-1} (F_j - C_j \cdot \xi_{\rho,j-1}), \quad j = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Для параллельного решения системы (3) может быть использован алгоритм, предложенный в работах [4] или [5].

IV. МЕТОД ДЕКОМПОЗИЦИИ ЛИНЕЙНЫХ РЕКУРРЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЙ

Данный метод основан на свойстве ассоциативности произведения матриц [6, 7]. Формулы для блочно-трехдиагональной матрицы (уравнение(3)), нахождения коэффициентов прогонки и конечного решения являются рекуррентными соотношениями первого или второго порядка. С помощью алгебраических преобразований их можно представить в виде произведения блочно-

треугольных матриц и для параллельных вычислений произведений матриц применить метод биективного сдавивания [8].

Рассмотрим один из вариантов построения параллельных алгоритмов.

Так как матрицы B_j не являются скалярными, то для дальнейших преобразований воспользуемся их невырожденностью (в общем случае).

Параллельный алгоритм построим для системы (3), домноженной слева на диагональную матрицу $D = diag(B_1^{-1}, B_2^{-1}, \dots, B_n^{-1}, E)$.

Для решения новой системы воспользуемся LU разложением блочно-треугольной матрицы DA :

$$DA = \begin{pmatrix} B_1^{-1} A_0 & E & & \\ B_2^{-1} C_1 & B_2^{-1} A_1 & E & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ C_n & A_n & & \end{pmatrix}.$$

Теперь новая матрица удовлетворяет требованию скалярности наддиагональных блоков.

Для простоты вычислений запишем получившуюся матрицу в форме, аналогичной матрице A :

$$DA = \begin{pmatrix} \tilde{A}_0 & \tilde{B}_1 & & \\ \tilde{C}_1 & \tilde{A}_1 & \tilde{B}_2 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \tilde{B}_n \\ \tilde{C}_n & \tilde{A}_n & & \end{pmatrix}.$$

Тогда формулы

$$LU = \begin{pmatrix} E & 0 & & \\ L_1 & E & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ L_n & E & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 & R_1 & & \\ 0 & U_2 & R_2 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ 0 & & & U_{n+1} \end{pmatrix}$$

разложения, являющиеся частью блочной прогонки, примут вид:

$$U_0 = \tilde{A}_0,$$

$$L_k = \tilde{C}_k U_{k-1}^{-1},$$

$$R_k = \tilde{B}_k$$

$$U_{k-1} = \tilde{A}_{k-1} - L_{k-1} R_{k-1}, \quad k \geq 2.$$

Перепишем последнюю формулу

$$U_{k-1} = \tilde{A}_{k-1} - L_{k-1} R_{k-1} = \tilde{A}_{k-1} - \tilde{C}_{k-1} U_{k-2}^{-1} \tilde{B}_{k-1}.$$

В силу скалярности

$$U_{k-1} = \tilde{A}_{k-1} - \tilde{C}_{k-1} \tilde{B}_{k-1} U_{k-2}^{-1}.$$

Умножая последнее равенство с правой стороны на произведение матриц $U_{k-2} \cdot U_{k-3} \dots U_0$, получаем уравнение:

$$Q_k = \prod_{j=0}^k U_j.$$

$$Q_{k-1} = \tilde{A}_{k-1} Q_{k-2} - \tilde{C}_{k-1} \tilde{B}_{k-1} Q_{k-3},$$

$$\begin{aligned} Q_{-1} &= E, \\ Q_0 &= \tilde{A}_0. \end{aligned}$$

Полученное уравнение является рекурсией второго порядка.

Для преобразования рекуррентной формулы воспользуемся блочными «векторами» $W_k = \begin{pmatrix} Q_k \\ Q_{k-1} \end{pmatrix}$.

Тогда последнюю формулу можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} W_{k-1} &= F_{k-1} W_{k-2}, k = 2, \dots, n, \\ F_{k-1} &= \begin{pmatrix} \tilde{A}_{k-1} & -\tilde{C}_{k-1} \tilde{B}_{k-1} \\ E & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Для вычисления всех частных произведений W_k можно воспользоваться каскадной схемой [8].

V. Выводы

Полученная в работе блочно-трехдиагональная система с матричными коэффициентами при аппроксимации системы уравнений Навье-Стокса для уравнения неразрывности задачи обтекания позволяет для ее численного решения использовать алгоритм матричной прогонки (параллельной матричной прогонки), а при некоторых преобразованиях и алгоритм декомпозиции рекуррентных соотношений.

Для нахождения численного решения по предложенным параллельным алгоритмам используются системы с распределенной памятью, позволяющие ускорить решения задачи.

Также в работе приводится фрагмент параллельной программы на языке Python для задачи построения расчетной сетки в физической области модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковеня В.М. Алгоритмы расщепления при решении многомерных задач аэрогидродинамики. – Новосибирск. Изд-во СО РАН.2014. – 280 с.
2. He Yuanyan, Le Jialing, Ni Hongli. Numerical research of airframe/engine integrative hypersonic vehicle // Proc.of the 12 Intern.Conf.on the Methods of Aerophysical research, 28 June-3 July 2004. – Novosibirsk: Publishing House “Nonparel”, July 2004.
3. Гамолина И.Э., Семенистый В.В. Параллельная модель решения класса задач обтекания сверхкритических крыловых профилей воздушным потоком // Системный анализ и прикладная синергетика, материалы 11 Всесоюзной конференции. Архыз. – 2022. – С. 336-340.
4. Згицовский А.А., Лиходед Н.А. Модифицированный метод параллельной матричной прогонки // Известия Национальной академии наук Белоруссии. Серия физ.-мат. наук. – 2019. – Т. 55, № 4.
5. Акимова Е.Н. Распараллеливание алгоритма матричной прогонки // Математическое моделирование. – 1994. – Т. 6, № 9. – С. 61-67.
6. Фролов А.В. Ещё один метод распараллеливания прогонки с использованием ассоциативности операций // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции, 28-29 сентября 2015 г., г. Москва. – М.: Изд-во МГУ, 2015. – С. 151-162.
7. Stone H.S. Parallel Tridiagonal Equation Solvers // ACM Trans. On Math. Software. – Dec. 1975. – Vol. 1, No. 4. – P. 289-307.
8. Герегель В.П. Теория и практика параллельных вычислений: учебное пособие. – 4-е изд. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2024. – 500 с.

Секция V

**ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
В ОБЛАСТИ МЕДИЦИНЫ**

DOI: 10.18522/syssyn-2024-51

**Математическое моделирование управляемого
роста опухолевых клеток в процессе
персонализированного лечения**

Графина Ольга Альбертовна
Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
graftina3@gmail.com

Душин Сергей Евгеньевич
Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
dushins@yandex.ru

Мелдо Анна Александровна
Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
anna.meldo@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются проблемы управляемого роста опухолевых клеток. Обосновывается необходимость индивидуального подхода к лечению заболевания. Предлагаемая методика моделирования базируется на использовании банка математических динамических моделей и параметрической идентификации. Выбор прогностической модели основан на исходном диагнозе. Процесс лечения интерпретируется как функционирование медико-технической системы управления.

Abstract. The problems of controlled growth of tumor cells are considered. The necessity of an individual approach to the treatment of the disease is substantiated. The proposed modeling technique is based on the use of a bank of mathematical dynamic models and parametric identification. The choice of a prognostic model is based on the initial diagnosis. The treatment process is interpreted as the functioning of a medical and technical management system.

Ключевые слова: онкология, управляемый рост клеток, персонализированная терапия, динамические модели, медико-техническая система управления.

Keywords: oncology, controlled cell growth, personalized therapy, dynamic models, medical and technical management system.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших стратегий индивидуализированного лечения является концепция персонализированной медицины (в США – прецизионной медицины). Персонализированная медицина (ПМ) выдвинута в качестве приоритетной области стратегического развития России

до 2030 года. Многие специалисты ожидают, что внедрение концепции персонализированной онкологии в повседневную клиническую практику окажет существенное воздействие на прогнозирование заболеваний, точность диагностики и ход терапии. Важно подчеркнуть, что процесс персонализированного подхода осуществляется в режиме реального времени.

II. ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ ТЕРАПИЯ

Термин «персонализированная медицина» (индивидуализированная, персонифицированная) стал популярен в конце XX – начале XXI века. ПМ предполагает такой выбор лечения, который базируется на учете индивидуальных особенностей пациента. Концепция ПМ в корне отличается от концепции «стандартизированного лечения», основанного на результатах клинических испытаний и больших когортных исследований [1]. Как отмечается в [2], «концепция индивидуального подхода начинает побеждать идеологию преувеличенной догмы доказательной медицины, основывающейся только на «диктате» клинических исследований и статистике».

Важнейшими компонентами персонализированной терапии являются клиническая эффективность (увеличение выживаемости, контроль над развитием заболевания), безопасность (контроль за токсичностью), фармакологическая обоснованность и улучшения качества жизни больного. Для каждой локализации опухоли должен существовать индивидуализированный подход к противоопухолевой терапии, который зависит от биологических особенностей опухоли.

Концепция ПМ акцентирует внимание на важности междисциплинарного подхода для более эффективного использования достижений современной науки в клинической практике.

Развитие концепции ПМ в онкологии стимулируется заметным прогрессом в области молекулярно-информационных технологий. Сегодня данное направление, начав свое развитие с узкой специализации по индивидуальной медикаментозной терапии, преобразовалось в широкий круг применяемых нозологий [2]. Существующие информационно-аналитические подходы, предназначенные для определения индивидуальных предикторов реакции на лекарственные средства, позволяют получать сравнительно точное предсказание развития заболеваний, а также направлены на создание новых генно-терапевтических препаратов.

Значительный интерес к внедрению индивидуализированных подходов, вызванный успехами фармакогенетики, фармакогеномики и фармакопротеомики, обусловлен значительной частотой неэффективных и нежелательных реакций на медикаменты у тех пациентов, которым назначались лекарства без учета индивидуальных особенностей их организма. Важнейшую основу ПМ составляет молекулярная диагностика (МД). При этом МД не отвергает классические способы постановки диагноза, но предлагает еще некоторые аспекты: возможность выявления заболеваний на ранних стадиях, подбор индивидуального и наименее опасного лечения, интеграция диагностики и терапии, мониторинг и прогнозирование лечения.

Использование современных технологий анализа биомолекул, таких как генетические исследования ДНК и РНК, анализ изменений белков и других, в определенных случаях позволяет выявлять причины заболеваний, оценивать их стадии и индивидуализировать подход к лечению. Помимо этого, она опирается на применение биомаркеров.

В [3] подчеркивается важность выявления фармацевтических биомаркеров, определяющих воздействие медикаментов на организм. Как показали исследования, в настоящее время лишь у четверти пациентов с онкологическим диагнозом была отмечена успешная реакция на предлагаемую терапию, что подтверждает важность применения предиктивных биомаркеров в онкологии. Предиктивные биомаркеры обеспечивают информацию о реакции на конкретный вид лечения, помогая определить оптимальный подход к терапии [3].

На сегодняшний день онкология является лидером во внедрении элементов ПМ в практику лечения рака. При проведении операций или биопсии опухолевых тканей возможно выявление определенных онкологических маркеров с последующей разработкой индивидуализированной стратегии лечения для каждого конкретного пациента. Специфические мутации определенных генов, связанных с тяжестью заболевания и эффективностью лечения, уже установлены для некоторых видов рака, таких как рак молочной железы, меланома, рак легкого и толстой кишки. Примером таких биомаркеров может служить белок-рецептор эпидермального фактора роста второго типа (HER2) [3].

Следует отметить, что иммунотерапия играет ключевую роль в современном лечении раковых заболеваний. Одним из направлений в иммунотерапии является CAR-T-клеточная терапия, которая уже одобрена для лечения некоторых гематологических опухолей. Процесс начинается с извлечения Т-лимфоцитов у пациента, их дальнейшего размножения и генетическую модификацию для распознавания опухолевых клеток.

Исходя из изложенного, можно сделать следующие обобщения.

1. ПМ фокусируется на индивидуальных особенностях пациента и отличается от стандартизованного подхода к лечению. Это позволяет выбирать оптимальное лечение, основываясь на конкретных данных о каждом пациенте.

2. Ключевыми компонентами ПМ являются МД и разработка инновационных лекарств, которые позволяют выбирать наиболее эффективные и безопасные методы лечения.

3. Цель персонализированной фармакотерапии заключается не только в подборе нужного препарата для конкретного пациента, но и в исключении необходимости проведения экспериментов на организме человека.

4. Активное внедрение биомаркеров помогает оценить состояние здоровья пациента, прогнозировать развитие заболеваний и выбирать оптимальное лечение.

5. Применение информационных технологий, основанных на методах математического и компьютерного моделирования с помощью динамических моделей, составляет сравнительно новое и перспективное направление в персонализированной онкологии.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ОПУХОЛИ ПРИ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОМ ЛЕЧЕНИИ

Как было отмечено выше, перспективы исследований в онкологии связываются с персонализированным лечением при совместном использовании математического (компьютерного) моделирования с целью прогнозирования развития заболевания, что может быть достигнуто для конкретного пациента выбором наиболее подходящей математической модели (ММ) управляемого процесса из созданного банка моделей.

Ставится задача разработки общей методики моделирования управляемого процесса роста опухоли по индивидуальным данным больного, получаемых в ходе терапии. Общая методика предполагает до некоторой степени ее инвариантность к виду рака, например, солидного.

Проблема заключается в следующем. Пусть группа больных (тестируемая группа) успешно прошла курс лечения определенного онкологического заболевания. Вполне естественно, что для какого-либо больного, находящегося на излечении со схожим диагнозом, что и у тестируемой группы, назначаются те же препараты, хотя этот больной может отличаться от тестируемых по целому ряду показателей (отличительные факторы):

- наличием сопутствующих заболеваний, в том числе других опухолей (множественный синхронный или мехатронный рак), которые были выявлены еще до начала лечения;

- наличием иммунодефицита и гормональной дисфункции;
- состоянием опухоли и иммунной системы на момент ее обнаружения;
- возрастом;
- наследственной предрасположенностью;
- наличием избыточного веса,
- присутствием хронического воспалительного процесса и доброкачественных образований;
- вредными привычками и неправильным питанием и т.д.

Это все внутренние (эндогенные) факторы влияния на заболевание.

Наряду с эндогенными следует учитывать и внешние (экзогенные) факторы, которым подверглись или подвергаются онкобольные:

- повышенное ультрафиолетовое облучение, что может повредить генетическую структуру клеток;
- ионизирующие излучения, которые часто приводят к повреждению ДНК и способствуют развитию опухолей. Такие воздействия могут происходить при продолжительном, но не сильной интенсивности излучения, а также после получения высокой дозы, даже в единичном случае;
- электромагнитные поля вызывают хронические воспаления, что способствует развитию опухоли. Это происходит при регулярном и интенсивном воздействии;
- постоянное механическое повреждение, которое сопровождается частой заменой клеток, что может вызвать нарушение последовательности генов в ДНК;
- контакт с опасными химическими веществами на рабочих местах и их присутствие в окружающей среде;
- наличие в организме определенных длительных вирусных инфекций, таких как папилломавирус, ВИЧ, вирус гепатита В и С;
- применение определенных медикаментов может повысить риск, особенно при неконтролируемом использовании гормональных препаратов.

Эти экзогенные факторы следует рассматривать в виде внешних воздействий (возмущений) на опухоль как объекта лечения (управления). Они могут явным образом учитываться в ММ роста опухоли.

В силу указанных выше факторов результат лечения может оказаться совершенно иным нежели в тестируемой группе. Поэтому при моделировании процесса развития заболевания и назначении лечения возникает необходимость учитывать индивидуальные особенности больного.

IV. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ В ХОДЕ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОЙ ТЕРАПИИ

Многие изучаемые динамические параметризованные модели, которыми описывается рост опухолевых клеток [4], представляются в виде нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

$$\Psi(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n)}, a_1, a_2, \dots, a_p) = 0.$$

Коэффициенты (параметры) a_i принимаются постоянными во времени, т.е. предполагается, что изменчивость характера поведения каждой модели определяется вариациями этих параметров.

В других случаях рассматриваются ММ, представленные дифференциальными уравнениями в частных производных, с помощью которых лучше описывается метастазирование опухоли. Эти модели также характеризуются своими параметрами.

Таким образом, параметры динамических моделей, полученные по индивидуальным данным, должны скрыто учитывать перечисленные эндо- и экзогенные факторы (если только они не включаются явно в уравнения), а также другие, еще быть может не обнаруженные факторы, сказывающиеся на росте опухоли. Эти параметры определяющим образом характеризуют текущее состояние организма, влияют на ход болезни и прогнозирование лечения. На них ложится большая «многофакторная нагрузка».

Компьютеризированная методика моделирования при персонализированной терапии определяется следующими этапами.

1. Выбор динамических моделей. Вообще говоря, выбор моделей для прогнозирования роста опухолевых клеток происходит исходя из сопоставления диагностируемого вида опухоли с множеством ММ (по-другому, с созданным банком моделей: математических, компьютерных). Это множество включает конечный набор моделей с сосредоточенными параметрами, описываемых ОДУ (солидные опухоли), так и модели с распределенными параметрами, учитывающими распределение опухоли в пространстве, что важно при ее метастазировании. Банк формируется из существующих на сегодня и изученных моделей, поэтому он все время пополняется.

Выбор моделей может зависеть и от стадии развития опухоли. При достаточном количестве экспериментов допустима разработка иерархической структуры банка по стадиям заболевания, когда на каждой стадии применяются свои уровня модели.

Предполагается, что динамика всех моделей, включенных в банк, была предварительно глубоко исследована. Это важно, поскольку при персонализированном лечении следует руководствоваться принципом исключения (минимизации) временных затрат на изучение поведения. Преследуется фундаментальный подход к исследованию, т.е. должны быть выявлены все особенности динамики опухоли, которые следует учитывать при управлении (лечении). Сюда включаются нахождение различных патологических состояний покоя опухоли (в силу нелинейного характера моделей возможно несколько состояний равновесия); выявление границ областей притяжения к равновесию, сепаратрис, предельных цик-

лов; наличие бифуркаций и катастроф (например, резкое качественное изменение поведения объекта при плавном изменении параметров, от которых оно зависит), обострений процессов; не исключено проявление хаоса в виде странных аттракторов. Например, появление седло-узла в начальной стадии, вполне можно трактовать как предопухолевое состояние, переходящее в онкологическое заболевание. Все эти нелинейные эффекты должны быть согласованы с онкологами. Врачи должны ответить на вопросы: встречаются ли в их клинической практике подобные ситуации; возможны, но пока не встречались; невозможны в принципе, т.е. это только особенности математических моделей (видимо, недостаточно адекватных), а не самих опухолей.

Свои особенности выявляются и для моделей с распределенными параметрами.

Следует отметить, что систематизацию особенностей поведения сравнительно легко произвести для систем невысоких порядков (2-го, 3-го). При более высоких порядках потребуется проведение большого количества вычислительных экспериментов для выявления особых траекторий.

Возникает вопрос о возможности выявления таких особенностей при использовании моделей, основанных на нейронных, в частности, КАН-теории и динамических сетях, которые сейчас столь популярны. В перспективе следует изучить этот вопрос.

Руководствуясь принципом исключения каких-либо исследований во время лечения, весь необходимый анализ поведения моделей, в том числе, управляемых, должен быть проведен на предварительной (долечебной) стадии лечения. Помимо выявления особенностей поведения каждой модели, включенной в банк моделей, она должна содержать всю возможную ее динамику. Сюда следует отнести все разнообразие процессов при различных начальных (и, быть может, граничных) состояний в условиях биологически разумных изменений параметров модели. Если модель включает в себя управляющие (терапевтические) воздействия в виде различных лекарственных препаратов, их сочетаний и доз, то следует изучить разнообразие поведения в условиях лечения и результаты также включить в банк. Тем самым осуществляется своеобразное «обучение модели» на различные ситуации. Вся полученная таким образом информация о динамике модели будет представлять собой цифровой двойник. В таком случае при лечении следует выбирать ту модель, которая по своим динамическим свойствам приближается к полученным персонализированным данным и позволяет наилучшим образом прогнозировать рост опухоли у конкретного пациента.

При исследовании следует различать:

- «рафинированные» модели, не осложненные терапией (лекарственными препаратами, лучевыми воздействиями, другими факторами). Такие модели в теории управления принято называть автономными или собственно системы управления. Именно такие модели часто приводятся в литературных источниках;
- модели, учитывающие онкологическое лечение.

К исследованию моделей, пополняющих банк, предъявляются чрезвычайно высокие требования. Какие-либо ошибки в виде промахов, из которых могут следовать неверные рекомендации, исключены. Для надежности возможны дублирующие вычислительные эксперименты, проведенные независимо.

Как пример цифрового двойника солидной опухоли можно взять ММ Решиньо и Де Лизи [5]. Эта модель описывает естественные процессы динамики опухоли при наличии противостоящей реактивной популяции лимфоцитов, рост которой стимулируется самой опухолью. Предполагается, что взаимодействие между лимфоцитами и опухолевыми клетками происходит на поверхности сферической опухоли. Для описания ситуации, когда лимфоциты поступают в систему с постоянной скоростью, их ММ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\lambda_1 x + \alpha_1 \frac{xy^{\frac{2}{3}}(1 - \frac{x}{x_c})}{1+x}, \\ \frac{dy}{dt} &= \lambda_2 y - \alpha_2 \frac{xy^{\frac{2}{3}}}{1+x}, \end{aligned}$$

где λ_1 – параметр, характеризующий естественную убыль лимфоцитов в отсутствие опухоли; λ_2 – параметр, характеризующий естественный рост опухолевых клеток в отсутствие лимфоцитов; α_1 – параметр, характеризующий рост и поддержание количества лимфоцитов; α_2 – параметр, характеризующий интенсивность воздействия лимфоцитов на опухоль; x – количество лимфоцитов; y – количество опухолевых клеток; x_c – предел численности лимфоцитов.

Представленная модель обладает определенной универсальностью, и может быть ориентирована на несколько видов раковых заболеваний, которые характеризуются наличием солидных опухолей: рак молочной железы, легкого, предстательной железы, желудочно-кишечного тракта. Модель демонстрирует концепцию иммунного надзора.

Иммунный надзор представляет собой механизм, с помощью которого иммунная система осуществляет контроль за организмом с целью выявления и уничтожения аномальных клеток, таких как опухолевые. Данный процесс включает в себя распознавание измененных антигенов на поверхности клеток и инициацию иммунного ответа по отношению к ним. Такой ответ может осуществляться с помощью цитокинов, антител или эффекторных клеток, таких как Т-лимфоциты (Т-клетки).

Растущая опухоль имеет тенденцию к васкуляризации (обеспечение кровеносными сосудами и, следовательно, кровью органов, областей и частей тела) и имеет свою собственную циркуляцию. Лимфоциты могут транспортироваться к частям внутренней части солидной опухоли, и поэтому можно было бы предположить взаимодействие между лимфоцитами и всей опухоли, а не только ее поверхности, как предполагается в данной модели. Учет процесса васкуляризации позволяет создавать биологически более реалистичные модели.

Исследования ММ Решиньо и Де Лизи [6] направлены на выявление топологических особенностей, что составляет фундаментальную основу моделирования. Одна

из значимых задач – выявление состояний равновесия. В устойчивом состоянии покоя опухоль существует длительное время, что можно рассматривать как фазу ремиссии заболевания.

2. Получение (измерения) данных о процессе роста в течение определенного интервала времени. Для разработки персонифицированных динамических моделей потребуются данные пациента о состоянии опухоли на определенном, непродолжительном временном интервале. Чем больше будет интервал и чем чаще поступают данные о процессе (частота регистрации), а в идеале желательно иметь непрерывное измерение, тем адекватнее определяются коэффициенты (параметры) модели по экспериментальным данным. Однако этот интервал не может быть слишком большим, поскольку опухоль разрастается и болезнь развивается. Скорость роста для разных видов рака различна, вследствие чего интервал существенно варьируется. Следует учитывать, что измерения (получение данных о состоянии опухоли) размеров опухоли производятся с определенной погрешностью, что, вообще говоря, следует учитывать при моделировании. Учет погрешностей приводит к использованию методов анализа и синтеза неопределенных систем управления.

Здесь предполагается использование данных о росте, полученных *in vivo*, т.е. от пациента, хотя методика не исключает использования данных об опухолевом материале конкретного пациента (в результате взятия биопсии), в дальнейшем выращиваемого *in vitro*, т.е. вне пациента, причем этот биологический материал индивидуальный. При этом данные о размерах опухоли можно получать постоянно с приемлемой погрешностью измерений. Такие исследования успешно ведутся за рубежом, например, в Израиле. Эксперимент с живой опухолью можно предусмотреть в методике наравне с математическим моделированием. Также можно включить и эксперименты с животными, хотя существует проблема гуманности таких экспериментов.

3. Статистическая обработка данных на ограниченном начальном интервале времени. По существу, осуществляется параметрическая идентификация выбранной модели. При этом можно использовать любой метод идентификации, в частности, метод наименьших квадратов (МНК). После проведения идентификации модель используется для предсказания и управления процессами. В дальнейшем, коэффициенты пересчитываются каждый раз после получения новых данных о больном, тем самым происходит постоянное уточнение модели в ходе вычислительного эксперимента (моделирования).

Для идентификации параметров модели Решиньо и Де Лизи применялся МНК. Неизвестные значения коэффициентов (параметров) модели определялись в результате минимизации суммы квадратов разности между экспериментальными данными и значениями, предсказанными моделью.

Так, для вычисления неизвестных параметров λ_1 и α_1 , использовался критерий вида

$$S = \sum \left(\frac{dx}{dt_i} + \lambda_1 x_i - \alpha_1 \frac{x_i y_i^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{x_i}{x_c} \right)}{1 + x_i} \right)^2 \rightarrow \min.$$

Согласно известной методике МНК была получена система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров λ_1 и α_1 :

$$\begin{cases} \lambda_1 \sum x_i^2 - \alpha_1 \sum x_i k = -\sum x_i \frac{dx}{dt_i}, \\ -\lambda_1 \sum k x + \alpha_1 \sum k^2 = \sum k \frac{dx}{dt_i}, \end{cases}$$

где

$$k = \sum \frac{x_i y_i^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{x_i}{x_c} \right)}{1 + x_i}.$$

Вводя обозначения:

$$\Delta = \begin{pmatrix} x^2 & -kx \\ -kx & k^2 \end{pmatrix}, \quad \Delta \lambda_1 = \begin{pmatrix} -x \frac{dx}{dt} & -kx \\ k \frac{dx}{dt} & k^2 \end{pmatrix}, \quad \Delta \alpha_1 = \begin{pmatrix} x^2 & -x \frac{dx}{dt} \\ -kx & k \frac{dx}{dt} \end{pmatrix},$$

Получаются искомые решения:

$$\lambda_1 = \frac{\Delta \lambda_1}{\Delta}, \quad \alpha_1 = \frac{\Delta \alpha_1}{\Delta}.$$

Аналогичным образом вычисляются параметры λ_2 и α_2 из второго уравнения. Критерий минимизации имеет вид

$$S = \sum \left(\frac{dy}{dt_i} - \lambda_2 y_i + \alpha_2 \frac{x_i y_i^{\frac{2}{3}}}{1 + x_i} \right)^2 \rightarrow \min.$$

Система линейных алгебраических уравнений приобретает вид:

$$\begin{cases} -\lambda_2 \sum y_i^2 + \alpha_2 \sum y_i k = -\sum y \frac{dy}{dt_i}, \\ \lambda_2 \sum k y_i - \alpha_2 \sum k^2 = -\sum k \frac{dy}{dt_i}, \end{cases}$$

где

$$k = \frac{x_i y_i^{\frac{2}{3}}}{1 + x_i}.$$

Обозначая

$$\Delta = \begin{pmatrix} -y^2 & ky \\ ky & -k^2 \end{pmatrix}, \quad \Delta \lambda_2 = \begin{pmatrix} -y \frac{dy}{dt} & ky \\ -k \frac{dy}{dt} & -k^2 \end{pmatrix}, \quad \Delta \alpha_2 = \begin{pmatrix} k^2 & -y \frac{dy}{dt} \\ -kx & -k \frac{dy}{dt} \end{pmatrix},$$

Получаем решения:

$$\lambda_2 = \frac{\Delta \lambda_2}{\Delta}, \quad \alpha_2 = \frac{\Delta \alpha_2}{\Delta}.$$

Пусть рассматривается модель с параметрами

$$\lambda_1 = 0.48, \lambda_2 = 1.4, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 2.8, x_c = 50.$$

Фазовый портрет системы представлен на рис. 1.

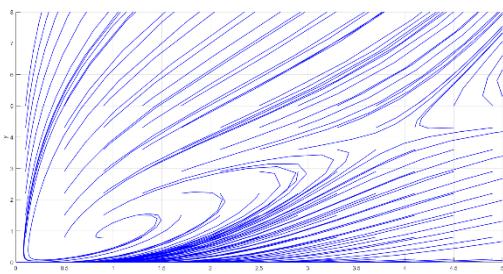


Рис. 1. Фазовый портрет модели Решиньо и Де Лизи

Примем начальные условия $x_0 = 2$ и $y_0 = 2$. Временные процессы, соответствующие фазовой траектории, приведены на рис. 2, 3.

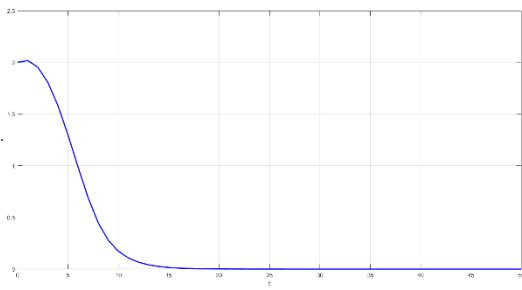


Рис. 2. График изменения лимфоцитов $x(t)$



Рис. 3. График изменения опухолевых клеток $y(t)$

Для наглядности процесс вычисления параметров во времени можно представить в виде графиков. На рис. 4 приведены графики значений параметров α_1 и l_1 , на рис. 5 – графики значений параметров α_2 и l_2 .

Установившиеся значения параметров α_1 и l_1 равны 1.001 и 0.481 соответственно, параметров α_2 и l_2 – 2.799 и 1.399 соответственно. Средние погрешности составляют 0.027 и 0.014 для α_1 и l_1 , 0.001 и 0.001 для α_2 и l_2 .

4. Выработка стратегии управления. Опираясь на результаты ранее проведенных (аналитических, численных) исследований поведения данной модели во всем возможном ограниченном пространстве состояний при широком изменении параметров (анализ динамики в области всех допустимых значений параметров модели), вырабатываются персонализированные рекомендации по лечению, т.е. формируется стратегия управления. Определяется цель управления, например, достижение приемлемого (патологического) равновесного состояния или области притяжения (аттрактора). Цель может пересматриваться в процессе моделирования в зависимости от выбора анализируемой модели, от течения заболевания.

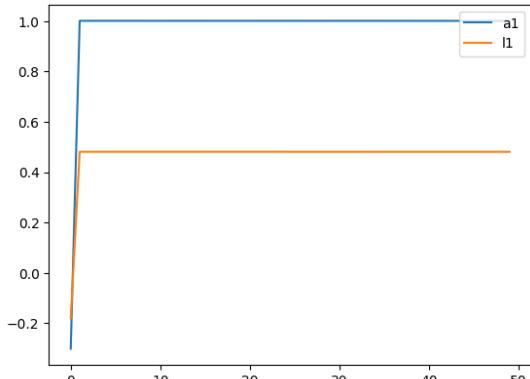


Рис. 4. Графики процесса вычисления параметров α_1 и l_1

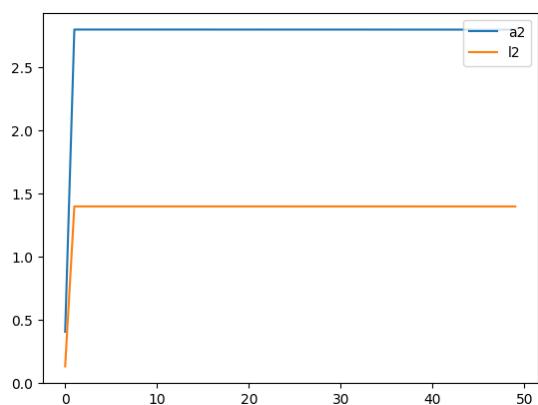


Рис. 5. Графики процесса вычисления параметров α_2 и l_2

5. Лечение (управление процессом). Введение лекарственных препаратов:mono- и полихимиотерапия, их дозы, длительность (цикличность) и скорость введения препаратов, сочетания лекарств, определяют множество (элементами множества являются различные медицинские препараты, их сочетания, дозы, длительности и скорости введения). Влияние различных препаратов на процесс лечения, концентрации лекарств и т.п. должно быть учтено в банке моделей.

Другим способом лечения является лучевая терапия: управление дозой (интенсивностью) облучения, длительностью, периодичностью.

Процесс лечения рассматривается в рамках медико-технической системы управления. Система формируется как супервизорная, когда врач-регулятор выведен из основного контура управления, но может вмешиваться в настройку, а в общем случае, в переключение закона управления в процессе длительного лечения. В качестве управляющих устройств используются различные дозаторы, инфузионные насосы, регулирующие подачу лекарственных средств. Также могут использоваться рентгеновские, ультразвуковые установки, лазеры и т.д. Система предусматривает диагностический комплекс.

Способ лечения влияет на выбор закона управления [7]. Выбираются любые подходящие законы управления из множества (множество допустимых законов управления), которые ведут к достижению поставленной цели:

- линейный, например, ПИД-управление, нелинейный, например, логико-динамический или синергетический;

- сосредоточенный, распределенный;
- оптимальный, квазиоптимальный, не оптимальный;
- адаптивный;
- робастный;
- прогностический.

Поскольку скорость моделирования (имитации), во всяком случае для сосредоточенных моделей, существенно превышает эволюцию роста опухоли, даже самой быстрорастущей (например, лимфомы Беркитта), целесообразно проводить последовательную имитацию со всем множеством выбранных законов управления. Допустимо организовать и параллельную имитацию процессов с различными законами управления. Те законы, которые ведут к неудовлетворительным результатам (невозможность достижения поставленной цели управления), что должно проявиться в ходе моделирования (значительное отклонение размеров опухоли от реально наблюдаемых), исключаются из рассмотрения.

6. Переход к другой модели. Как только в ходе имитации выясняется, что работа с выбранной моделью из не приводит к удовлетворительным результатам для всех допустимых законов управления, осуществляется переход к другой ММ модели с последующей параметрической идентификацией.

7. Переход к другим лекарственным препаратам. В том случае, если исследование с имеющимся набором моделей исчерпано, а результат, направленный на излечение в принятом понимании, не достигнут, то осуществляется переход к другим лекарственным препаратам в соответствие с множеством.

8. Комплексная методика лечения. Следует предусмотреть другую методику лечения, например, комплексную, включающую химиотерапию, лучтерапию, иммунотерапию.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современные подходы к лечению онкологического заболевания требуют персонализированного подхода.
2. Прогнозирование роста опухолевых клеток целесообразно осуществлять на основе математических динамических моделей.
3. Реализация персонализированной терапии основана на параметрической идентификации динамических моделей.
4. Методика моделирования, отражающая рост опухоли, содержит выбор оптимальных лекарственных препаратов, их дозы, комбинации и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirchhof P., Sipido K.R., Cowie M.R. et al. The continuum of personalized cardiovascular medicine: a position paper of the European Society of Cardiology // Eur Heart J. – 2014. – 35 (46). – Р. 3250-3257.
2. Шляхто Е.В., Конради А.О. Персонализированная медицина. История, современное состояние проблемы и перспективы внедрения // Российский журнал персонализированной медицины. – 2021. – 1 (1). – С. 6-20.
3. Лишиц Г.И., Филипенко М.Л., Шевела А.И. Персонализированная медицина: лечить не болезнь, а больного // Наука из первых рук. – 2012. – № 2 (44). – С. 58-65.
4. Kuang Y., Nagy J.D., Eikenberry S.E. Introduction to Mathematical Oncology. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 472.
5. Shapot V.S. On the Manifestations and Mechanisms of the Systemic Effects of the Tumor on the Body // Journal of Pathophysiology and Experimental Therapy. – 1974. – Vol. 2. – P. 3.
6. Душин С.Е., Шпаковская И.И., Графина О.А. Математическое моделирование управляемого роста опухоли // Современная наука и инновации. Научный журнал. – Ставрополь, Пятигорск, 2022. – № 2 (38). – С. 16-27.
7. Душин С.Е., Мелдо А.А., Графина О.А., Шпаковская И.И. Применение методов теории управления в онкологии // V Междунар. научн. конф. по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2023): Сб. докл. Санкт-Петербург. 26–28 сентября 2023 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – С. 168-171.

Разработка модели определения порога анаэробного на основе неполного нагрузочного тестирования

Куцало Анатолий Леонидович

ФГУП «Научно-исследовательский институт гигиены, профпатологии и экологии человека»
ФМБА России
kutsalospb@yandex.ru

Стаськова Анна Романовна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И.Ульянова (Ленина)
AnnaStascova@yandex.ru

Чиков Александр Евгеньевич

ФГУП «Научно-исследовательский институт гигиены, профпатологии и экологии человека»
ФМБА России
chikov.alexandr@yandex.ru

Шпаковская Ирина Игоревна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И.Ульянова (Ленина)
iishpakouskaya@gmail.com

Аннотация. В данной работе построена модель предсказания порога анаэробного обмена у спортсменов при выполнении нагрузочного тестирования на беговой дорожке. Для построения модели были выбраны алгоритмы с использованием линейной регрессии. Значение средней абсолютной ошибки модели составило 24.81 секунд. Разработанная модель предназначена для проведения упрощенного варианта кардиореспираторного нагрузочного тестирования для спортсменов.

Abstract. In this paper, a model for predicting the threshold of anaerobic metabolism in athletes when performing stress testing on a treadmill is constructed. Algorithms using linear regression were chosen to build the model. The average absolute error of the model was 24.81 seconds. The developed model is designed to carry out a simplified version of cardiorespiratory stress testing for athletes.

Ключевые слова: ПАНО, регрессия, лаг, нагрузочное тестирование, кислород, углекислый газ.

Keywords: PANO, regression, lag, stress testing, oxygen, carbon dioxide.

I. ВВЕДЕНИЕ

Порог анаэробного обмена (ПАНО) – это фаза перехода организма от аэробного метаболизма к анаэробному. При аэробном энергообеспечении, когда интенсивность нагрузки ниже уровня ПАНО, глюкоза (основной источник энергии при физических нагрузках) расщепляется до углекислого газа и воды. Повышение интенсивности нагрузки выше ПАНО сопровождается образование большого количества метаболитов анаэробного гликолиза, в том числе и лактата. Метаболиты накапливаются в мышцах и постепенно поступают в кровь приводя к существенному снижению уровня Ph, нарушает проведение нервных импульсов, ухудшают сократительные способности мышц, нарушают координационные способности и т.д. Все эти неблагоприятные изменения отрицательно сказываются на возможность продолжать выполнять физическую нагрузку высокой интенсивности и вызывают отказ от ее выполнения.

ПАНО служит показателем выносливости организма и работоспособности спортсмена поскольку положительно коррелирует со способностью выдерживать длительную физическую нагрузку.

Поэтому определение ПАНО имеет важное значение для тренировочного процесса спортсменов. Знание этого параметра позволяет тренерам рассчитывать тренировочные зоны интенсивности для индивидуализации тренировочного процесса, снижения рисков риска переутомления и травм.

Методов определения ПАНО довольно много: нагрузочные тестирования до отказа в лабораторных условиях, в полевых условиях, с определением параметром газообмена, уровня лактата в крови, частоты сердечных сокращений. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки, одни довольно точны, но требуют дорогостоящего оборудования и инвазивные исследования, другие методы менее точные, но с использованием более простым приборов, однако все эти методы требуют выполнения физической нагрузки «до отказа», что накладывает существенные ограничения на их использование: тестирование 1-2 раза в год, корректировка плана подготовки перед тестированием, необходимость присутствия врача-реаниматолога.

Разработка способа определения ПАНО определения порога анаэробного на основе неполного нагрузочного тестирования позволит упростить методику тестирования и снять ограничения ее использования.

Построение модели

Данные были получены в результате эксперимента в Научно-исследовательском институте гигиены, профпатологии и экологии человека ФМБА России города Санкт-Петербурга. Письменное информированное согласие было получено от всех участников.

В результате этого исследования были получены 1495 наблюдений для 232 спортсменов. Результаты были отображены в отдельных файлах. Каждый файл представляет собой одно нагрузочное тестирование. В качестве нагрузочного тестирования (КАРЕН-теста) в работе рас-

сматривается нагрузка на ступенчато возрастающей беговой дорожке, имеющее следующие характеристики: нагрузка на первой ступени 5 км/ч, длительность первой и последующих ступеней 2 минуты, на каждой ступени увеличение нагрузки составляла 1,5 км/ч.

Регистрация газообмена и ЧСС с помощью сердечно-легочной диагностической системы “Oxycon Pro” проводилась непрерывно на протяжении всего тестирования. При отказе спортсмена или при достижении максимального расчетного ЧСС по формуле “220 – возраст” [1] эксперимент останавливался.

В данных представлены следующие столбцы:

- Time – текущее время тестирование. Все показатели усреднены по отрезкам в 5 секунд;
- V_E – минутный объем дыхания (МОД) представляет собой количество воздуха, вентилируемого за 1 минуту. Измеряется в л/мин;
- HR – частота сердечных сокращений (ЧСС) отображает реакцию организма на нагрузки, уд/мин;
- V_O2 – объем потребление кислорода является показателем аэробной производительности, мл/мин;
- V_CO2 – объем выделение углекислого газа, мл/мин;
- BF – частота дыхания раз/мин;
- Масса – вес спортсмена в килограммах;
- Возраст – полный возраст спортсмена на момент проведения исследования;
- AT_time – время ПАНО выставленное после анализа;
- Workload – фаза теста, которая может быть либо 1 – нагрузка, либо 0 – восстановление;
- WR – мощность нагрузки, Вт;
- Step – номер ступени.

A. Очистка данных

Для оценки параметров были построены гистограммы. Одна из гистограмм представлена на рис. 1.



Рис. 1. Гистограмма зависимости массы от возраста

По графику видно, что данные зашумлены, что обусловлено спецификой видов спорта и возрастом спортсменов участвующих в исследовании. В связи с этим необходимо применить один из способов фильтрации. Межквартильный размах (Interquartile range) IQR – мера вариативности одномерного распределения случайной величины. Это разность между третьим и первым квартилями. После очистки данных можно наблюдать график без явных выбросов.

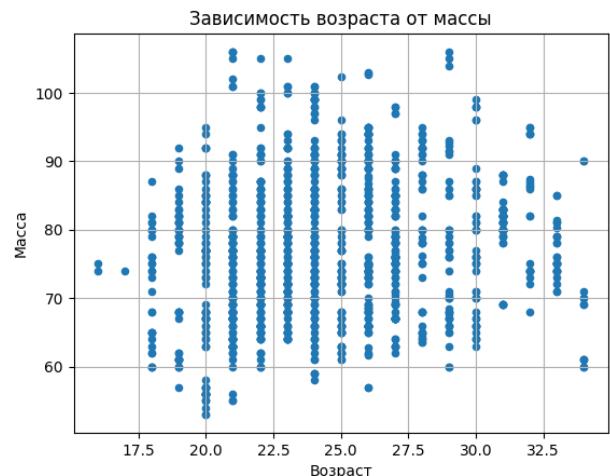


Рис. 2. Гистограмма зависимости массы от возраста после очистки

B. Модель потребления кислорода

Для построения модели первоначально была выбрана динамическая модель потребления кислорода.

Зная основы физиологии [2] можно сказать, что при увеличении интенсивности физической нагрузки, обозначаемой как мощность нагрузки (WR), увеличивается и количество потребляемого кислорода (VO_2) в организме в процессе аэробного метаболизма, где энергия вырабатывается с использованием кислорода. То есть, с увеличением мощности нагрузки, объем потребляемого кислорода также увеличивается.

Однако, по достижении определенного уровня нагрузки, происходит интересное явление: скорость потребления кислорода перестает увеличиваться и становится стабильной, несмотря на дальнейшее увеличение мощности нагрузки. Это явление обычно связано с выходом на максимальное потребление кислорода и работы при дальнейшем повышении интенсивности, все больше обеспечивается за счет анаэробного лактатного механизма энергообеспечения. Таким образом, возрастание мощности нагрузки после определенного уровня не приводит к дальнейшему увеличению потребления кислорода в организме в процессе аэробного метаболизма.

Пусть x – мощность нагрузки, а $y(x)$ – количество потребляемого кислорода. Пусть b – максимально возможное количество потребляемого кислорода, которое на данный момент нам не известно. При $b=y(x)$ значение переменной $b-y(x)$ будет стремиться к нулю. Пусть новая величина будет умножена на некий коэффициент k , благодаря которому мы сможем избежать неточность модели.

Потребление кислорода $y(x)$, как было сказано ранее, будет увеличиваться при увеличении мощности нагрузки x . Тогда произведение $y(x)*k(b-y(x))$ должно характери-

зователь изменение скорости потребления кислорода с увеличением нагрузки, учитывая фактор увеличения $y(x)$ и уменьшения $k(b-y(x))$.

Очевидно, что скорость потребляемого кислорода при изменении нагрузки можно записать как дифференциальное уравнение $\frac{dy(x)}{dx}$.

Тогда итоговое уравнение получится следующим:

$$\frac{dy(x)}{dx} = y * k(b - y).$$

Поделим обе части на $y(b-y)$ и перенеся dx в правую часть, после чего возьмем интеграл:

$$\int \frac{dy}{y(b-y)} = \int kdx.$$

Взяв интеграл, можно записать:

$$\frac{-\ln(\frac{y-b}{y})}{b} = dx$$

Найдем у учитывая постоянную интегрирования специально опущенную ранее:

$$y = \frac{b}{1 - C \cdot e^{-bx}}.$$

Значение коэффициентов необходимо найти для точной работы модели. Для каждого спортсмена коэффициенты будут различны.

Разбив получившиеся результаты коэффициентов на кластеры, было замечено, что большая часть исследований относится к одному кластеру. Благодаря этому методу был построен график изменения кислорода во времени. График представляет собой линейное изменение параметра. Полученные результаты позволили сформулировать предположение предсказания значение на ранних этапах тестирования благодаря смещениям.

C. Респираторная модель

Метод определения ПАНО с помощью дыхательного (респираторного) коэффициента (RER) основан на измерении отношения объема выдыхаемого углекислого газа (VCO_2 л/мин) к объему поглощаемого кислорода (VO_2 л/мин) во время физической нагрузки.

Формула респираторного коэффициента:

$$RER = \frac{VCO_2}{VO_2}.$$

При достижении ПАНО и выше происходит более значительное увеличение выделения углекислого газа и по сравнению с приростом потребления кислорода, а RER становится равным и больше 1.

Суть респираторной модели на основе смещений заключается в том, что текущее значение переменной от её предыдущих значений, или "лагов". Обычно в таких моделях учитывается несколько предыдущих значений переменной, и они используются для прогнозирования её будущих значений.

Необходимо проанализировать высокая ли взаимосвязь между временным рядом и его лагированными значениями с учетом корреляции в промежуточных ла-

гах. Для этого была использована частичная автокорреляция. Она количественно определяет, насколько каждое запаздывающее значение связано с текущим значением после учета влияния всех промежуточных задержек.

Коэффициент Пирсона от -1 до 1 показывает силу и направление взаимосвязи между переменными, значения близкие к нулю свидетельствуют об отсутствии связи. Частичная автокорреляция вычисляется между наблюдениями временных рядов и их предыдущими временными шагами. Эта форма корреляции, использующая значения из более ранних моментов времени, называется автокорреляцией. В отличие от обычной автокорреляции, частичная автокорреляция учитывает и прямую, и косвенную связь, что делает ее более точной и полезной для анализа временных рядов.

На рис. 3 представлены частичные автокорреляции для VCO_2 и VO_2 .

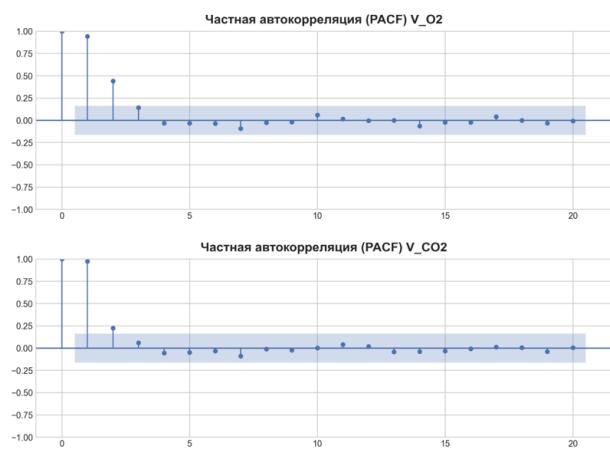


Рис. 3. Частичные автокорреляции для VCO_2 и VO_2

Благодаря нахождению лагов, была построена модель линейной регрессии на основе смещения.

Математически линейная регрессия моделирует не-наблюдаемую или зависимую переменную и наблюдаемую или независимую переменную с помощью линейного уравнения.

Представим модель кислорода:

Пусть исследуется N замеров, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, и для каждого известны временные ряды VO_2 и VCO_2 длины m .

Модель может быть представлена в виде

$$\widehat{VO_2}_i = \omega_0 + \omega_1 \cdot \widehat{VO_2}_{i-1} + \omega_2 \cdot \widehat{VO_2}_{i-2} + \omega_3 \cdot \widehat{VO_2}_{i-3},$$

где ω_k – параметры модели ($k \in \{0 \dots 3\}$), индивидуальные для каждого спортсмена, а $\widehat{VO_2}_{i-k}$ – k -ый лаг ряда VO_2 .

Ставится задача нахождения такого вектора

$$\boldsymbol{\omega}_{VO_2} = \begin{pmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4,$$

чтобы значения $\widehat{VO_2}_i$ были наиболее близки к исходным данным VO_2 .

Лаги дополняются незначимой единицей для удобства векторной записи:

$$\mathbf{x}_i = (1, VO2_{i-1}, VO2_{i-2}, VO2_{i-3}).$$

Теперь

$$\widehat{VO2}_i(\mathbf{x}) = \mathbf{x}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_{VO2}.$$

Модель углекислого газа строится аналогичным образом:

$$\widehat{VC02}_i(\mathbf{x}) = \mathbf{x}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_{VC02}.$$

Для решения задачи вводится матрицы признаков:

$$\begin{aligned} X_{VO2} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & VO2_1 & 0 & 0 \\ 1 & VO2_2 & VO2_1 & 0 \\ 1 & VO2_3 & VO2_2 & VO2_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & VO2_{m-1} & VO2_{m-2} & VO2_{m-3} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times 4}, \\ X_{VC02} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & VC02_1 & 0 & 0 \\ 1 & VC02_2 & VC02_1 & 0 \\ 1 & VC02_3 & VC02_2 & VC02_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & VC02_{m-1} & VC02_{m-2} & VC02_{m-3} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times 4}. \end{aligned}$$

Причем

$$VO2 = \begin{pmatrix} VO2_1 \\ \dots \\ VO2_m \end{pmatrix}, CO2 = \begin{pmatrix} VO2_1 \\ \dots \\ VO2_m \end{pmatrix} \in R^m -$$

метки регрессии.

Аналитическое решение линейной регрессии:

$$\widehat{VO2}_i = \mathbf{x}_i \cdot (X_{VO2}^T X_{VO2})^{-1} X_{VO2} \mathbf{VO2},$$

$$\widehat{VC02}_i = \mathbf{x}_i \cdot (X_{VC02}^T X_{VC02})^{-1} X_{VC02} \cdot \mathbf{VC02},$$

На основании построенной модели можно построить предсказание. Например, в следующий момент времени (за известными значениями) для углекислого газа:

$$\widehat{VC02}_{m+1} = \mathbf{x}_{m+1} \cdot (X_{VC02}^T X_{VC02})^{-1} X_{VC02} \cdot \mathbf{VC02}.$$

Если обратить внимание на формулу модели (VO2), то веса обозначают зависимости между VO2 на промежутке времени. Можно предположить, что веса будут характеризовать скорость прироста VO2.

После построения модели и проведения ее оценки, принято решение заменить линейную регрессию на линейную регрессию с регуляризацией.

Регуляризация в линейной регрессии – метод машинного обучения, направленный на достижение обобщаемой модели путем снижения весовых коэффициентов до нуля, тем самым предотвращая чрезмерное использование сложных моделей. В результате регуляризация предотвращает переобучение и уменьшает дисперсию модели.

Для используемой в работе Ridge – регрессии (или L2 – регрессии), новая функция потерь принимает вид

$$J_{Ridge}(\boldsymbol{\omega}) = MSE + \lambda \cdot \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega},$$

где λ – степень воздействия слагаемого (или «штрафа») за большие коэффициенты.

В модели вносятся соответствующие корректировки:

$$\widehat{VO2}_i = \mathbf{x}_i \cdot (X_{VO2}^T X_{VO2} - \lambda I)^{-1} X_{VO2} \mathbf{VO2},$$

$$\widehat{VC02}_i = \mathbf{x}_i \cdot (X_{VC02}^T X_{VC02} - \lambda I)^{-1} X_{VC02} \cdot \mathbf{VC02},$$

где I – единичная матрица $m \times m$ с нулем в левом верхнем углу.

Одним из способов оценить качество регрессионной модели в отношении набора данных является расчет средней абсолютной ошибки. Средняя абсолютная ошибка (MAE), является метрикой, которая позволяет нам определить среднее значение абсолютной разницы между предсказанными значениями и фактическими значениями в наборе данных. Чем ниже MAE, тем лучше модель соответствует набору данных.

$$MAE = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n},$$

где y_i – наблюдаемое значение для i -го наблюдения;

\hat{y}_i – прогнозируемое значение для i -го наблюдения;

n – размер выборки.

Другой способ – вычислить среднеквадратичную ошибку (далее RMSE), которая демонстрирует среднее расстояние между прогнозируемыми значениями из модели и фактическими значениями в наборе данных. Формул для вычисления RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}},$$

где P_i – прогнозируемое значение для i -го наблюдения в наборе данных;

O_i – наблюдаемое значение для i -го наблюдения в наборе данных;

n – размер выборки.

Из-за квадрата в RMSE увеличивается вес ошибки, тем самым если в данных присутствуют выбросы, которые важно учитывать, то такой способ вычисления ошибки будет чувствительнее к наблюдениям, которые далеки от среднего.

Чем ниже ошибка, тем лучше данная модель может «соответствовать» набору данных.

Метрикой оптимальности длины ряда с точки зрения модели выбраны MAE и RMSE.

Обучение модели проводилось в двух вариантах: на первых 5 минутах теста (60 отсчетов) и на первых 8 минутах (100 отсчетов).

При обучении на 100 отсчетах ошибки модели вышли следующими: MAE – 24.81; RMSE – 35.57.

При обучении на 60 отсчетах: MAE – 60, 63; RMSE – 86,46.

Минимальное необходимое число отсчетов для обучения модели будет исследовано в будущем.

На рис. 4 представлена модель предсказания по рецираторному коэффициенту для 10 эксперимента при обучении на 60 отсчетах.

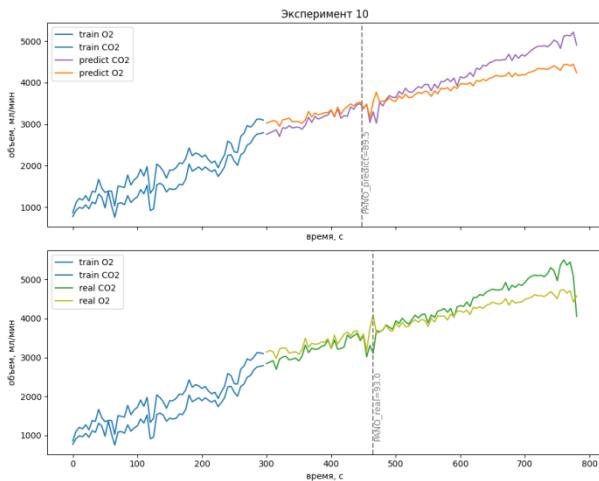


Рис. 4. Пример работы модели предсказания

Следующим этапом необходимо будет рассмотреть улучшение модели с помощью введения показателя частоты сердечных сокращений (ЧСС), а также выявить какие из показателей могут влиять на достижения ПАНО так же хорошо, как кислород и углекислый газ.

Стоит отметить, что точное количество отсчетов для обучения моделей выбрано почти случайным образом. Его точное число еще предстоит узнать.

II. УЛУЧШЕНИЕ МОДЕЛИ

Чтобы рассмотреть возможность улучшения модели, необходимо обратить внимание на такой показатель как ЧСС, который служит реакцией организма на внешнюю нагрузку.

Для взрослого человека, находящегося в состоянии покоя, средний показатель ЧСС варьируется от 60 до 80 ударов в минуту. На ЧСС влияют такие особенности как возраст, пол, вес, физическое состояние и другие факторы.

При средних по интенсивности физических нагрузках средний ЧСС может достигать от 130 до 150 ударов в минуту. Это значение может быть выше или ниже в зависимости от индивидуальных характеристик организма и интенсивности тренировки.

Резкие скачки ЧСС, наблюдаемые на графике (рис. 5) в начале каждой ступени вызваны рефлекторной реакцией организма с целью обеспечить работающие органы достаточным кровоснабжением при увеличении интенсивности нагрузки. Так как интенсивность вовремя тестирования повышается не значительно, излишняя реакция ЧСС исчезает и далее ЧСС устанавливается на уровне достаточноном для обеспечения работающих мышц кислородом и питательными.

В отличие от данных V_{CO_2} и V_{O_2} , в ЧСС (далее HR – heart rate) не преобладает линейный тренд (пример на рис. 5). То есть линейная регрессионная модель окажется несостоятельной.

Для более точного предсказания необходимо применять методы нелинейного моделирования. В отличие от линейных регрессионных моделей, которые предполагают прямую зависимость между переменными, нелинейные модели позволяют учитывать более сложные взаимосвязи, характерные для биологических процессов.

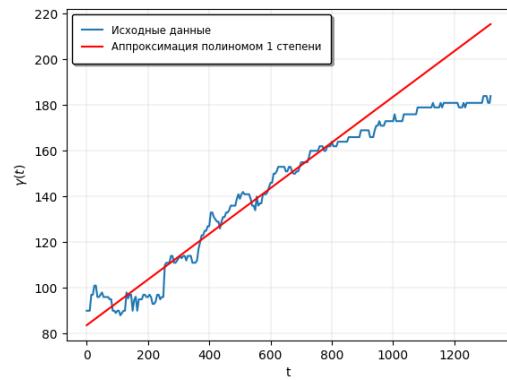


Рис. 5. Нелинейная зависимость $HR(t)$

Одним из подходов к моделированию ЧСС может быть использование полиномиальной регрессии, которая позволяет учесть криволинейные тренды в данных, однако, это чревато появлением лишних корней, которые добавят в тренд некорректные паттерны. Поэтому оптимальным решением будет выбрать параметрическую кривую, наилучшим образом описывающую характер зависимости $HR(t)$, и, используя методы аппроксимации кривой определять ее персонифицированные параметры на первых m отсчетах (принимая объем полученных данных за $n > m$)

Кривая строится из следующих соображений:

1. Пульс здорового человека в покое находится в диапазоне 60-80 уд/мин.
2. Максимальный пульс здорового человека находится в диапазоне 180-200 уд/мин.
3. На первых этапах повышения нагрузки рост частоты сердечных сокращений экспоненциальный.
4. Средний участок аппроксимируется прямой.
5. Приближение ЧСС к порогу сопровождается замедлением роста.

Описанным выше критериям соответствует поднятая логистическая кривая:

$$HR(t) = \frac{K \cdot P_0 e^{rt}}{K + P_0(e^{rt} + 1)} + H_0,$$

где H_0 – пульс спортсмена в покое, $K - H_0$ – максимальный пульс спортсмена, r – коэффициент, демонстрирующий скорость роста ЧСС, $P_0 + H_0$ – начальное значение пульса при измерении.

В условии недостающих данных начальные приближения параметров могут быть оценены следующим образом:

1. $H_0 = 70$ уд/мин (среднее значение).
2. $P_0 = HR_0 - H_0$, где HR_0 – первое измерение.
3. $r = 0.004$ – среднее значение, полученное по рассматриваемой в работе выборке.

Метод выбора оптимальной кривой подразумевает нахождение параметров, минимизирующих целевую функцию (или функцию ошибки) E :

$$H_0, P_0, K, r = \hat{\theta} = \underset{\theta \in \Theta}{\operatorname{argmin}} E(HR(\theta, t), HR_{real}(t)),$$

где $\Theta \subset [50; 110] \times [0; 50] \times [80; 130] \times [0, 1]$, θ – оцениваемый 4х мерный вектор параметров, $\hat{\theta}$ – оптимальный в смысле выбранной целевой функции набор параметров модели, t – дискретный набор меток времени объемом m .

То есть

1. ЧСС в покое между 50 и 110 уд/мин.
2. Начало измерений при пульсе от H_0 до $H_0 + 50$ уд/мин.
3. Максимальный пульс от $H_0 + 80$ до $H_0 + 130$.
4. r изменяется в пределах от 0 до 1.

Используя метод наименьших квадратов, целевая функция которого имеет вид

$$E(HR(\theta, t), HR_{real}(t)) = MSE \\ = \sum_{i=1}^m (HR(\theta, t_i) - HR_{real}(t_i))^2$$

на первых $m = \frac{2}{3}n$ отсчетах можно добиться точности $MAE = 8$ уд/мин, что составляет 11% от среднего ЧСС на ПАНО. Примеры приближений процессов представлены на рис. 6.

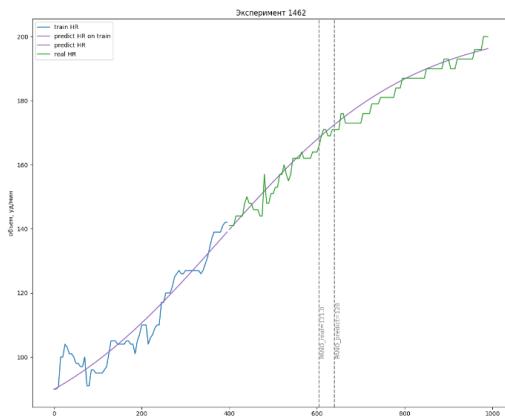


Рис. 6. Пример работы модели

III. Вывод

В результате работы была построена линейная регрессионная модель предсказания ПАНО у спортсменов на первых ступенях кардиореспираторного нагрузочного тестирования.

При обучении на 100 отсчетах ошибки модели вышли следующими: MAE – 24.81 с; RMSE – 35.57 с, а при обучении на 60 отсчетах: MAE – 60, 63 с; RMSE – 86,46 с.

Так же уже рассмотренное предсказание дополнительного параметра ЧСС показало высокие результаты. MAE – 8 уд/мин, составляет 11% от среднего ЧСС на ПАНО. Вводить ЧСС как третий параметр для предсказания ПАНО в будущем имеет высокую значимость, так как тренеру и спортсмену именно ЧСС и нужен в тренировочном процессе, так как с его помощью можно легко контролировать зоны тренировочной интенсивности.

Полученные результаты модели можно оценить как удовлетворительными, так как достигают экспертных показателей. Разработанная модель предназначена для проведения упрощенного варианта КАРЕН-теста для спортсменов. Объем физической нагрузки уменьшен значительно по сравнению с полноценным КАРЕН-тестом за счет сокращения продолжительности и интенсивности нагрузки. В перспективе планируется доработка модели путем анализа дополнительных параметров, таких как минутный объем дыхания, функциональное состояние спортсмена перед тестированием и другие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генгин М.Т., Скуднов В.М., Петрушова О.П., Соловьев В.Б. Кислотно-основные показатели крови спортсменов различных квалификационных групп в норме и при физической работе // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 2010. – № 5. – С. 539-544.
2. Холл Дж.Э. Медицинская физиология по Гайтону и Холлу: пер. с англ. / под ред. В.И. Кобриной, М.М. Галагудзы, А.Е. Умрюхина. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Логосфера, 2018.

Применение СВЧ-излучения для деконтаминации инструментов хирургического, стоматологического и косметологического назначения

Байбурин Вил Бариевич
кафедра «Информационная безопасность
автоматизированных систем»
Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
baiburinvb@rambler.ru

Мещанов Валерий Петрович
ООО «НПП «НИКА-СВЧ»
Саратов, Россия
nika373@bk.ru

Дорошенко Валентина Михайловна
кафедра «Радиоэлектроника
и телекоммуникации»
Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
dorvalentina9@gmail.com

Аннотация. В настоящее время вопросы применения различных физических эффектов в медицинской практике являются актуальными и представляющими перспективное направление развитие отрасли. В данной работе будет представлен способ стерилизации различных объектов медицинского назначения при помощи СВЧ-поля. Данная технология позволяет существенно сократить время обработки зараженных объектов, а также создать портативные установки для стерилизации в полевых условиях.

Существующие на данный момент способы стерилизации реализуются при помощи стационарных установок, в которых время обработки измеряется часами. Авторами статьи предложена мобильная установка для СВЧ-стерилизации, которая может быть применена в различных областях: хирургии, стоматологии, косметологии и др.

Проведены исследования влияния СВЧ-поля на обрабатываемые объекты, указаны основные технологические этапы стерилизации, представлены результаты экспериментов по деконтаминации объектов из различных материалов (металл, пластик), разработана автоматическая система управления и электронная схема стерилизатора.

Abstract. Currently, the issues of using various physical effects in medical practice are relevant and represent a promising direction for the development of the industry. This paper will present a method for sterilizing various medical objects using a microwave field. This technology allows you to significantly reduce the time of processing contaminated objects, as well as create portable units for sterilization in the field.

The currently existing sterilization methods are implemented using stationary units in which the processing time is measured in hours. The authors of the article propose a mobile unit for microwave sterilization, which can be used in various fields: surgery, dentistry, cosmetology, etc.

Research has been conducted on the effect of the microwave field on the objects being processed, the main technological stages of sterilization are indicated, and the results of experiments on decontamination of objects made of various materials (metal, plastic) are presented. An automatic control system and electronic circuit for the sterilizer have been developed.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда (проект № 22-19-00357).

Ключевые слова: СВЧ-поле, стерилизация, медицинские инструменты, портативная установка.

Keywords: microwave field, sterilization, medical instruments, portable unit.

I. ВВЕДЕНИЕ

Более ста лет проводятся исследования взаимодействия электромагнитного поля с биомедицинскими объектами и материалами. Особый интерес представляет влияние СВЧ-поля на патогенную микрофлору. Одним из основных результатов проводимых исследований, который неоднократно подтверждался как экспериментально, так и теоретически, заключается в существенной роли электромагнитного излучения в клеточных и молекулярных процессах, не связанных с нагревом и термическими эффектами [1–4]. Данные процессы могут происходить без поднятия температуры при очень коротком воздействии мощными электромагнитными импульсами на биоматериалы.

Пандемия COVID-19 стимулировала внимание к изучению взаимодействия электромагнитного поля с биоматериалами, в результате чего в последние годы стали появляться теории, объясняющие научную природу этого явления [1–4]. Практическое применение полученных результатов исследований выделилось в отдельное научно-техническое направление, где основной задачей стала разработка оптимальных технологий для уничтожения патогенной микрофлоры в процессе стерилизации медицинских и биологических объектов и материалов.

Современные стерилизаторы для медицинских инструментов представляют собой массивные стационарные установки с длительным временем обработки, достигающим 1-2 часов, и стоимостью в несколько сотен тысяч рублей. Кроме того, они основаны на принципах термического воздействия, что негативно сказывается на сроках службы инструментов, так как ведет к повреждению поверхностей острых инструментов. Таким образом, существует необходимость в разработке компактных и мобильных стерилизаторов, способных обрабатывать инструменты за считанные минуты. Эти устройства могут быть широко использованы в медицинской практике, включая работу в полевых условиях. На данный момент такие стерилизаторы отсутствуют как в России, так и за границей.

Установки, описанные в патентах [5, 6], не смогли привести к созданию практически применимых решений из-за сложностей в эксплуатации, предполагающей размещение каждого инструмента в пакете с дезинфицирующей жидкостью. Кроме того, в этих системах не удалось устранить проблему искрения во время облучения, что также ограничивает их эффективность. Однако возможность применения СВЧ-излучения для обработки объектов от патогенной микрофлоры имеет значительные преимущества перед существующими методами, такими как: обработка паром и горячим воздухом [7], ультрафиолетовым облучением [8], СВЧ-облучением в плазме [9], радиационным (рентгеновским) облучением [10], инфракрасным облучением [11].

Данные методы имеют ряд существенных недостатков, например, автоклавы имеют большие массо-габаритные показатели и длительное время обработки, ультрафиолетовая обработка не позволяет достичь достаточного уровня стерильности, так как не влияет на бактериальную микрофлору, а следовательно не применима в медицинской практике, обработка в плазме предполагает вакуумирование, что существенно усложняет технологию и ведет к высокой стоимости подобных установок, рентгеновское облучение требует дополнительных мер защиты персонала, так как стерилизационный эффект достигается при высоких дозах сигнала, при инфракрасном облучении значительно повышается температура обрабатываемых инструментов, что исключает обработку пластиковых объектов.

В данной работе изложены технологические основы создания сверхбыстро действующих мобильных СВЧ-стерилизаторов, а также результаты их практического применения. Приведен обзор результатов экспериментальных исследований по деконтаминации различных инструментов, зараженных штаммами основных бактерий, встречающихся в медицинских стационарах и косметологических кабинетах. Показано влияние данного метода обработки на сохранение целостности поверхностей как металлических, так и пластиковых инструментов различного назначения.

II. МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДЫ И КОНСТРУКЦИЯ СТЕРИЛИЗАТОРА

Результаты проведенных исследований по проблеме сверхбыстрой стерилизации, а также данные математического моделирования основных компонентов СВЧ-стерилизатора представлены в работах [12–17]. К основным компонентам относятся: волноведущая структура магнетронного генератора, рабочая резонаторная камера, объекты стерилизации. В исследовании были рассмотрены прямоугольные СВЧ-резонаторы, которые возбуждались с помощью прямоугольного волновода WR340 с поперечным сечением 86x43 мм на рабочей частоте 2,45 ГГц. Контейнер с инструментами, расположенными в воде, помещался в резонатор с размерами 500x360x280 мм. Этот контейнер устанавливался на диэлектрической подставке и располагался в пучности стоячей волны длиной 12,24 см.

Сам контейнер, размещаемый в рабочей камере, имеет размеры 300x300x190 мм. Таким образом, среднее расстояние между генератором и инструментами составляло 15 см. Схема исследуемой установки приведена на рисунке 1.

Вес портативной установки для СВЧ-стерилизации не превышает 20 кг, что позволяет допустить возможность ее использования не только в стационарных пунктах оказания медицинской помощи, но и в условиях труднодоступной местности, в полевых госпиталях, при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и т.д.

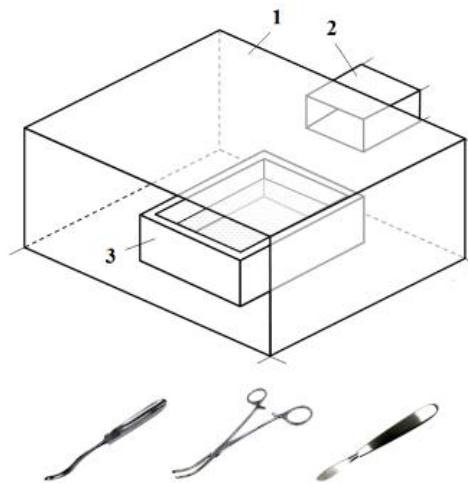


Рис. 1. Геометрическая модель микроволнового стерилизатора: полость резонатора (1), стандартный волновод (2) и пластиковый контейнер, наполненный водой (3)

Была построена трехмерная математическая модель с использованием уравнения Гельмгольца для термопараметрических сред и решена связанные краевые задача электродинамики и тепломассопереноса с учетом кинематической вязкости в уравнении гидродинамики [12]. Модельные уравнения решались методом конечных элементов. Применялся пакет программ COMSOL.V.5.2. Соответствующие модельные расчеты позволили построить структуру электрического поля в СВЧ-резонаторе и дать оценку уровня согласования нагрузки с источником СВЧ-энергии. Эта оценка позволила установить возможность использования около 10% отраженной мощности.

Были разработаны аналитические и численные модели для определения силы электромагнитного поля вблизи поверхностей инструментов, принимая во внимание разные углы падения, толщину слоя воды над поверхностью инструментов, диэлектрические свойства воды [13]. Исследования подтвердили, что максимальная толщина слоя воды над инструментами не должна превышать 7 мм. При такой толщине наблюдается резкое снижение тангенциальной компоненты электрического поля. Именно в этих условиях происходит уничтожение патогенной микрофлоры. Для достижения наилучшего стерилизационного эффекта, согласно расчетам, рекомендуется поддерживать толщину слоя воды в диапазоне от 1,5 до 3 мм.

Основные исходные допущения в методах расчета трехмерной математической модели даны в работах [14, 15]. Для построения математических моделей магнетронов был использован метод крупных частиц. Было построено совместное решение уравнений движения, Лапласа, Пуассона, волнового уравнения с использованием метода конечных разностей.

Воздушная система охлаждения магнетронов оказалась недостаточной, поэтому была разработана автоматическая система жидкостного охлаждения [16]. Функциональная схема автоматической системы управления охлаждением магнетрона представлена на рис. 2.

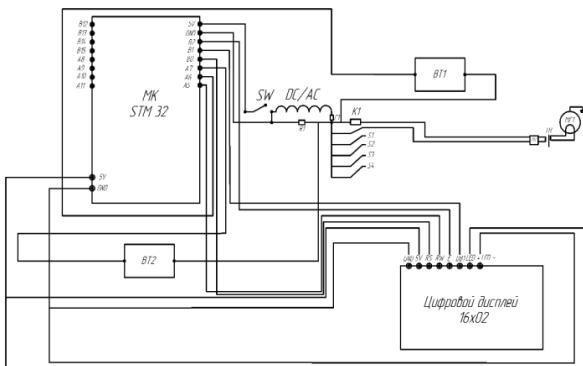


Рис. 2. Функциональная схема автоматической системы управления охлаждением магнетрона

В процессе проектирования портативного прибора для СВЧ обработки на были определены следующие требования к техническим параметрам прибора, а именно: материал корпуса (08X18H10T), степень защиты (IP65), температура эксплуатации до 180°. Конструкция стерилизатора состоит из следующего перечня элементов: дисплей M623J5133AK, который необходим для отображения информации о процессе обработки и выбора режимов обработки, переключателя положений и кнопки вкл/выкл, которые необходимы для плавной регулировки мощности и управления стерилизатором, крышка, окно, дверь, боковина составляют основной каркас самой конструкции прибора, крышка волновода и волновод необходим для передачи СВЧ энергии в рабочую резонаторную камеру.

Также была разработана электрическая схема управления процессом СВЧ обработки и нагревом магнетрона стерилизатора (рис. 3) состоит из следующих элементов: программного блока подключенного к переключателю SW3 и реле RY 2,5 необходимого для обработки и передачи информации о температуре и сигнале включения/отключения магнетрона, блок силовой электроники магнетрона, подключенный через высоковольтный ТН и низковольтный TL трансформатор, датчик температуры T1 подключенены к программному блоку для передачи и контроля состояния температуры через контактные группы реле 4 с целью получения сравнительной информации о параметрах температуры магнетрона.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСЛЕДОВАНИЙ

Были проведены экспериментальные исследования процесса деконтаминации инструментов различного назначения (хирургических, стоматологических, косметологических). Важным является тот факт, что обработке подвергались не только металлические объекты, а также инструменты содержащие пластиковые и полимерные вставки.

Исследование стерилизационного эффекта проводились на экспериментальном образце СВЧ-стерилизатора. (рис. 4). Данный образец является примером портативного устройства и позволяет осуществлять стерилизацию вне стационарных пунктов.

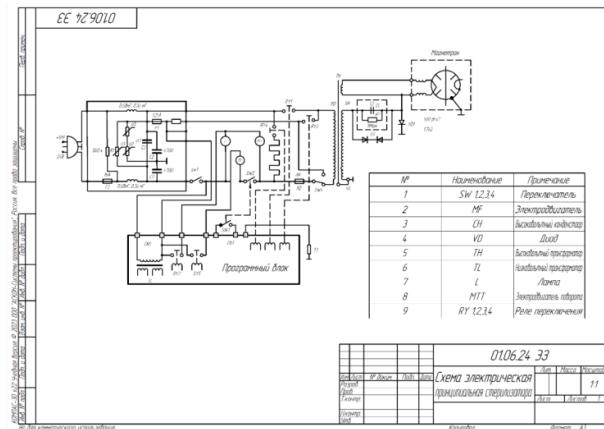


Рис. 3. Электрическая схема стерилизатора

Важными элементами управления такой установки является возможность регулирования мощности СВЧ-излучения и времени обработки инструментов.

Воздействию подвергались наборы инструментов различного назначения: хирургические, стоматологические и косметологические.



Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки для СВЧ-стерилизации

Первые серии экспериментов были проведены на типовых наборах хирургических металлических инструментах. Вид контейнера и примеры обрабатываемых инструментов представлены на рис. 5. Важным является взаимное расположение инструментов, не допускающее их взаимоперекрытия и соприкосновения. Инструменты помещены в жаропрочный контейнер и в последствии заливаются тонким слоем воды.



Рис. 5. Внешний вид контейнера с металлическими хирургическими инструментами

В рамках первой серии экспериментов для искусственного заражения медицинских инструментов (корцангов, иглодержателей, хирургических зажимов и т.д.) был использован штамм спорообразующих бактерий *B.antracoides*, так как уничтожение споробактерий, а не только вегетативных клеток, является важнейшей характеристикой полной стерилизации. Спорообразующие бактерии рода *Bacillus* в условиях медицинских стационаров могут попадаться из окружающей среды и контаминировать медицинские инструменты при длительном или неправильном хранении.

Чтобы подготовить бактериальную взвесь из однодневной культуры *B.antracoides*, был использован физиологический раствор, согласно стандартам мутности (ОСО 42-28-86-2013) ФГБУ «Научный центр экспертизы средств медицинского назначения» Минздрава России. Для активации спорообразования бактерии помещались в условия низкой температуры, и через сутки проводился контроль за наличием спор с использованием иммерсионной микроскопии мазков, окрашенных по методу Грама и Клейна. Инструменты подвергались искусственно му заражению путем полного погружения в бактериальную взвесь на 2-3 часа, после чего они помещались в контейнер для СВЧ-стерилизации. Бактериологический контроль проводился путем забора смывов и посевов на питательные среды, следуя нормативам по санитарно-бактериологическим исследованиям.

Итоги наблюдений фиксировались после инкубации в термостате (37°C) в течение 24, 48 и 72 часов. По результатам первой серии экспериментов была достигнута полная стерилизация при мощности 1000 Вт, где время обработки составило 8 минут для группы из 7 инструментов и 10 минут для группы из 9.

Второй этап экспериментов по СВЧ-стерилизации был осуществлён с использованием неспорообразующих бактерий (штамм *S.aureus* 209 Р) для заражения инструментов. Стапилококки представляют собой основные агенты госпитальных инфекций в современных медицинских учреждениях, а традиционные методы стерилизации, такие как автоклавирование, предусматривают режимы, пригодные как для обработки материалов с споровыми бактериями, так и для тех, что содержат только неспорообразующие вегетативные формы.

Для получения суспензии *S.aureus* (золотистого стапилококка) использовалась суточная культура, соответствующая стандарту мутности 5 МЕ, после чего проводилось стократное разведение (106 КоЕ/мл) для заражения в ходе хирургических экспериментов, что отражает количественные показатели содержания патогенных микроорганизмов в гнойных пробах.

В данной серии испытаний полная стерилизация была достигнута за 8 минут для групп из 5 и 7 инструментов, и за 10 минут для группы из 9 инструментов при мощности 1000 Вт.

Кроме эффекта стерилизации было оценено влияние данного метода обработки на поверхности инструментов. Измерение шероховатости поверхности металлических образцов медицинского инструмента проводились

на цифровом профилометре «SOONDA TR-210» и было показано полное сохранение исходного профиля, что существенно увеличивает срок службы инструментов.

Дальнейший интерес вызвало расширение области применения СВЧ-стерилизатора на стоматологические и косметологические инструменты, которые в свою очередь могут состоять не только из металлических, но и из пластиковых деталей. В этих областях также требуется стерилизационная обработка. При этом были получены следующие успешные экспериментальные результаты.

В третьей серии экспериментов подвергались стерилизации исключительно металлические инструменты. Для инфицирования использовались штаммы: *Bacillus cereus* (спорообразующая бактерия) и *Staphylococcus aureus* (золотистый стапилококк). Бактериологическое исследование, включающее смывы с инструментов по стандартной методике и посевы на чашках Петри, подтвердило эффективность стерилизации за 10 минут.

В четвертом этапе экспериментов стерилизации подвергались как металлические стоматологические и косметологические инструменты, так и металлические изделия, содержащие полимерные материалы. Для инфицирования применялись ранее упомянутые виды бактерий, а также штамм *E. coli* (кишечная палочка). Результаты стерилизации также оказались положительными, с временем обработки в 10 минут. Пример загрузки контейнера с инструментами стоматологического и косметологического назначения приведен на рис. 6. В данном случае необходимо выполнение всех вышеизложенных требований к взаимному расположению инструментов.



Рис. 6. Внешний вид контейнера с металлическими и пластиковыми инструментами стоматологического и косметологического назначения

Также экспериментально было показано, что для достижения полной стерилизации крупных инструментов, содержащих пластиковые элементы, для сохранения необходимого слоя воды над их поверхностью необходимо использовать медицинский нетканый материал, пропитанный водой (рис. 7).

Он обеспечит нужный слой жидкости на инструментах, что в свою очередь предотвратит искрения и обеспечит нужное для стерилизации воздействие СВЧ-поля. Такое дополнение к технологии стерилизации позволяет подвергать обработке инструменты любого размера с пластиковыми вставками из нетромостойких материалов.



Рис. 7. Пример стерилизации крупных инструментов с пластиковыми элементами

Таким образом, обобщая результаты исследований, описанные в данной статье и в предыдущих работах, можно с уверенностью говорить о высоком уровне эффективности экспериментального стерилизатора в разных областях. Однако остается нерешенным вопрос о применении СВЧ-стерилизатора в полевых условиях, экспедициях и зонах с активными конфликтами. При этом размеры и масса устройства позволяют осуществлять его практически ручную транспортировку.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе приведены основные этапы численного и экспериментального исследования СВЧ-стерилизатора. Доказана его эффективность для обработки металлических и пластиковых инструментов различного назначения. Описана технология стерилизации, в том числе и для крупногабаритных инструментов.

Посчитаны все конструктивно технологические параметры и элементы конструкции, которые обеспечили высокую эффективность стерилизатора в указанных областях применения.

ЛИТЕРАТУРА

- Гуляев Ю.В., Мещанов В.П., Кац Б.М., Коплевацкий Н.А. Лопатин А.А., Саягин К.А., Ёлкин В.А., Комаров В.В., Байбурина В.Б., Рытик А.П. Воздействие импульсным СВЧ-излучением на образцы пищевой продукции с целью увеличения показателей её микробиологической безопасности и сроков хранения // Проблемы особо опасных инфекций. – 2022. – Вып. 3. – С. 70-74 .

- Гуляев Ю.В., Черепенин В.А. О возможности использования мощных электромагнитных импульсов для обеззараживания бактериологически загрязненных объектов // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – 4. – С. 1-3.
- Гуляев Ю.В., Таранов И.В., Черепенин В.А. Использование мощных электромагнитных импульсов для воздействия на бактерии и вирусы // Доклады Российской академии наук. Физика, Технические науки. – 2020. – 493 (1). – С. 15-17.
- Байбурина В.Б., Тома А.И., Мещанов В.П., Балакин М.И., Чернышев С.Л., Дорошенко В.М., Комаров В.В., Никифоров А.И., Лунева И.О., Киркица В.А. Результаты и перспективы применения сверхвысокочастотного излучения в задачах стерилизации биомедицинских объектов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 6. – С. 25-32.
- Patent (US) № 5019344. Method for sterilizing articles' such as dental handpieces' / B.S. Kutnez, D.A. Latowicki. Filed 21.04.1988; Pub. 28.05.1991.
- Patent (US) № 5019359. Method and apparatus' for rapid sterilizing of material / B.S. Kutnez, D.A. Latowicki. Filed 22.11.1989; Pub. 28.05.1991.
- De Santis P. Steam sterilization in autoclaves // Handbook of Validation in Pharmaceutical Processes. – Fourth Edition. – CRC Press, 2021. – P. 217-230.
- Патент № 140768U1 РФ. Устройство для дезинфекции и стерилизации объектов / Тезиков Д.А., Тезиков А.П., Шишкова Ю.С., Филимонова О.И. МПК A61L 2/10 2014.
- Патент № 2161505 РФ. Способ стерилизации материалов при помощи СВЧ-излучения с высокой напряженностью поля и устройство для реализации способа / Корчагин Ю.В. МПК A61L 2/00. 1999.
- Розанов В.В., Матвеичук И.В., Черняев А.П., Николаева Н.А., Краснов С.А. Современное состояние и направления дальнейшего развития высокотехнологичных методов радиационной стерилизации // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 4. – С. 521-524.
- Стерилизатор СТ-ИК "РЭЛМА-3С", комплект Полный. – URL: <https://telma-gc.com> (дата обращения: 16.04.2024).
- Байбурина В.Б., Комаров В.В., Мещанов В.П. Моделирование электродинамических параметров микроволнового стерилизатора // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 52-58.
- Байбурина В.Б., Комаров В.В., Мещанов В.П. Математическое моделирование электромагнитных полей в рабочей среде СВЧ-стерилизатора хирургических инструментов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 6. – С. 47-52.
- Ерёмин В.П. и др. Анализ возможностей создания магнетрона повышенной мощности для свч-стерилизатора на основе математической модели и экспериментального образца // Journal of Electrotechnics. – 2022. – С. 39.
- Ерёмин В.П., Байбурина В.Б., Мещанов В.П., Комаров В.В., Пахомов Я.А., Ериков А.С., Дорошенко В.М., Никифоров А.А., Балакин М.И. Электродинамические и рабочие характеристики с источником излучения в виде двух спаренных магнетронов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26, № 6. – С. 60-67.
- Никифоров А.А., Байбурина В.Б., Пахомов и др. Портативная автоматическая система управления процессом охлаждения магнетронного генератора // Вопросы электротехнологии. – 2023. – № 3 (40). – С. 48-52.
- Baiburin V.B., Komarov V.V., Doroshenko V.M., Meshchanov V.P., Nikiforov A.A. Factors Affecting the Process of Microwave Sterilization of Medical Instruments // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2023. – P. 230-233.

Методы машинного обучения в радиомном анализе рака лёгкого. Перспективы и ограничения

Пономарев Никита Алексеевич

Кафедра вычислительной техники,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
samos.gik@mail.ru

Мелдо Анна Александровна^{1,2}

¹Кафедра вычислительной техники,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина);
²Кафедра лучевой диагностики,
Санкт-Петербургский Государственный Университет
Санкт-Петербург, Россия
info@etu.ru

Аннотация. Цель исследования: оценить возможности использования различных моделей машинного обучения для классификации радиомных характеристик рака легких на компьютерных томограммах. Задачи: выделить значимые радиомные признаки, на которые можно опираться при постановке диагноза, сравнить модели, построенные на основе различных методов машинного обучения. В работе представлено применение радиомного анализа образований в легких и моделей машинного обучения на наборе изображений из базы данных LIRA, содержащей снимки компьютерных томограмм пациентов с верифицированной патологией. В ходе исследования были сформулированы ограничивающие факторы, которые следует учитывать в работах данного направления.

Abstract. The aim of the study was to evaluate the potential of using various machine learning models for classifying the radiomic features of lung cancer in computer tomography scans. The objectives were to identify significant radiomic features that could be used for diagnosis, and to compare models based on different machine learning methods. The article presents the application of radiomic analysis of lung formations and machine learning models on a dataset of images from the LIRA database containing computer tomography scans of patients with verified pathology. During the study, several limitations were identified that should be considered in future work in this area.

Ключевые слова: Машинное обучение, радиомика, рак легкого, текстурный анализ.

Keywords: Machine learning, radiomics, lung cancer, texture analysis.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рак легкого (РЛ) – одно из лидирующих по уровню смертности онкологических заболеваний [1]. Однако, несмотря на большой спектр технологических возможностей, остается ряд нерешенных проблем, связанных как с ранним выявлением, так и с дифференциальной диагностикой РЛ [2, 3]. Одним из путей решения данных проблем является применение компьютерного зрения, реализуемого методами классического машинного обучения (МО), а также более сложными вычислительными способами, такими как нейросетевые технологии. В целом, применение технологий искусственного интеллекта

в диагностике РЛ – актуальное направление, широко обсуждаемое в научной литературе. Одним из направлений изучения текстуры образований в легких является радиомика или радиомный анализ (РА), с помощью которого предоставляется возможность извлечения из областей интереса (ОИ) на медицинских изображениях дополнительных данных, недоступных глазу врача [2, 4]. Статья посвящена проблематике радиомного анализа рака легкого в задаче выявления значимых радиомных признаков образований в легких. В ходе исследования мы сформулировали основные ограничения, устранение которых минимизирует неточности при применении технологий компьютерного зрения в диагностике. Статья структурирована сообразно выявленным трудностям, которые мы разделили на две основные группы. Первая – «медицинские факторы», а вторая – факторы, связанные с особенностями предобработки набора данных и применения методов машинного обучения к радиомному анализу образований в легких.

II. ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С МЕДИЦИНСКИМИ ФАКТОРАМИ

A. Ограничения, влияющие на качество наборов обучающих данных

В настоящее время в научной литературе описано множество систем поддержки принятия врачебных решений на основе компьютерного зрения, показывающих высокую степень информативности [5]. Эти системы обучены на наборах данных с различными подходами к разметке медицинских изображений, чаще всего опирающимися на согласованность мнения нескольких врачей [6, 7]. Вместе с тем, известно, что только 65% случаев РЛ имеют на КТ весь набор патогномоничных признаков, в 26% случаев изображения КТ могут соответствовать нескольким заболеваниям, в 9 % случаев РЛ имеет атипичную картину на КТ, поэтому даже врачи с большим опытом могут неверно интерпретировать снимки [8]. Таким образом, применительно к задаче автоматизированной дифференциальной диагностики РЛ необходимы только те снимки, которые относятся к случаям с верифицированной патологией (которая подтверждена биопсией). Радиомный анализ как способ создания биомаркеров визуализации, не доступных глазу врача, потенциально отражает строение (текстуру) опухоли

на клеточном уровне. Это подчеркивает важность использования только тех данных, которые подтверждены морфологически. Нехватка верифицированных данных является серьёзной проблемой в проведении подобных исследований. Количество открытых баз данных случаев в верифицированными заболеваниями крайне мало. Поиск таких баз занимает большое количество времени. Зачастую, существует необходимость в проверке факта верификации заболеваний, т.к. в описании базы данных не указывается, подтверждена патология или нет [9].

В нашем исследовании мы использовали 70 КТ пациентов с верифицированной патологией из базы данных LIRA [10], из которых 35 КТ содержат РЛ, 35 – иную патологию.

B. Вариативность данных

По данным литературы, в различных базах данных изображения КТ получены с использованием разного оборудования. При этом, несмотря на калибровку сканеров, характеристики изображений могут в той или иной мере отличаться. Поэтому, гипотетически, при РА таких изображений могут возникнуть неточности. В нашей работе на данном этапе мы не учитывали фактор различия КТ сканеров для получения изображений.

C. Доверие к результатам со стороны врачей

Одним из существенных ограничений применения методов МО в медицине является «непрозрачность», то есть выход за рамки определенной, привычной для врача схеме доказательности. Например, если врач, анализируя определенные признаки заболеваний на снимках, имеет представление, почему эти признаки патогномоничны, с какой частотой они могут встречаться, как они могут интерпретироваться при тех или иных условиях, то в случае РА сведения о сути выделенного радиомного признака и причинно-следственных связях получения результатов для врача весьма ограничены. Несмотря на то, что область МО постоянно совершенствуется, большинство специалистов не доверяют диагнозам, которые не имеют объяснения в привычном алгоритме мышления. Таким образом, на данный момент технологии искусственного интеллекта в медицине не находят широкого практического применения [11]. Поэтому требуется некоторое изменение парадигмы диагностического процесса в целом. Приведенное исследование направлено, в том числе, на ускорение процесса интеграции современных технологий в сферу медицины путем междисциплинарного обмена знаниями.

I) Применение РА. В исследовании мы использовали группы радиомных признаков, анализирующие текстурные особенности второго порядка, такие как:

- Матрица совпадений уровня серого (GLCM). Содержит 24 извлекаемых признака.
- Матрица зависимости уровня серого в окрестностях (GLDM). Содержит 14 извлекаемых признаков.
- Матрица распределения уровней серого по длине (GLRLM). Содержит 16 извлекаемых признаков.
- Матрица распределения уровней серого по зонам объекта (GLSZM). Содержит 16 извлекаемых признаков.

- Матрица разницы уровня серого в окрестностях (NGTDM). Содержит 5 извлекаемых признаков [2, 12].

РА проводился с использованием открытой библиотеки для языка программирования Python «PyRadiomics» [12].

Полученные характеристики были сформированы в наборы данных с добавлением отвечающего за класс патологии столбца «DiagnosisConfirmed».

2) Разделение данных на выборки. Перед применением к полученным радиомным характеристикам моделей МО, данные необходимо разделить на выборки для обучения и тестирования каждой модели. Исследование проводилось по трем различным обучающим выборкам:

a) Общая выборка из данных для 70 обработанных изображений КТ-снимков. Данные были разделены на обучающие и тестовые, где размер тестовых данных составлял 20% от всего датасета.

b) Выборка для определения точности работы модели на данных для рака легких. Так, данные для обучения на раке легких составили 28 снимков, а для иной патологии – сокращены до 21 снимка. Данные для тестирования работы модели также составили 20% от всего датасета.

c) Выборка для определения точности работы модели на данных для иной патологии. Данные для обучения на иной патологии составили 28 снимков, а для РЛ – сокращены до 21 снимка. Данные для тестирования модели также составили 20% от всего датасета.

После формирования выборок данные в них были нормализованы для последующего использования в моделях МО.

Таким образом было получено 6 различных наборов данных, разделенных на выборки – пять наборов по каждой группе признаков РА и один набор, объединяющий все данные воедино.

III. Сложности, связанные с особенностями предобработки набора данных и применения методов машинного обучения

A. Предобработка данных

Перед РА образования в легком необходимо выделить ОИ на каждом снимке КТ. База данных LIRA содержит необходимые для радиомного анализа сведения о верификации патологии, но разметка патологии на снимках основана на принципе определении координат объекта. Для выделения текстурных радиомных признаков второго порядка такой подход неприменим. Для данной задачи необходима разметка на основе сегментации ОИ. В нашем исследовании для визуализации, сегментации образований в легких применялся функционал свободной платформы, биомедицинских 3D-изображений 3D Slicer. Она содержит инструменты, применимые для радиомики, поэтому базы данных, предназначенные для РА, целесообразно размещать с помощью этого ресурса.

B. Высокие вычислительные мощности

Проблема недостаточных вычислительных мощностей действительно актуальна для проведения исследований, связанных с медицинскими изображениями. При выделении радиомных признаков на основе формы могут применяться способы понижения размерности дан-

ных, что затруднительно при выделении радиомных признаков образований в легких [13]. В данном исследовании мы использовали небольшой набор данных, вместе с тем необходимое для развития темы увеличение объема обучающих данных требует значительных вычислительных ресурсов.

C. Сложность интерпретации результатов работы машинного обучения

В исследовании использовались наиболее известные модели МО, такие как линейная регрессия (Linear Regression, LR), дерево решений (Decision Tree, DT), случайный лес (Random Forest, RF), метод ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN) и метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM).

LR – статистический метод оценки линейной зависимости между зависимой или целевой переменной и одной или несколькими независимыми переменными. Она позволяет определить зависимости между данными в обучающих выборках и использовать эти зависимости на данных для тестирования, чтобы оценить возможность использования данной модели в классификации патологии [14].

DT – «древовидная» модель МО, которая определяет простые условия и на их основе разделяет данные по категориям. Данная модель является легко интерпретируемой, так как её структура достаточно проста и понятна специалисту [14].

RF – модель, схожая с DT. Она использует множество деревьев решений, построенных на различных условиях. Совокупность этих деревьев называется ансамблем деревьев. Классификация патологии основана на так называемом голосовании – подсчете общего количества результатов всех деревьев в ансамбле с выбором наиболее часто встречаемого результата за истину. Такая модель, в отличие от DT, не легка в интерпретации за счет большого количества деревьев в ансамбле, которые усложняют общее понимание взаимосвязей исследуемых данных [14].

KNN – модель, которая разделяет данные на классы путем определения расстояния между исследуемым значением и ближайших его соседей, других значений, относящихся к тому или иному классу. Так, модель определяет класс патологии путем наиболее часто встречающегося класса соседних значений в евклидовом пространстве [14].

SVM – модель, разделяющая данные на классы в гиперплоскости. Она преобразует данные в высокоразмерное пространство так, чтобы их было возможно разделить линейно. С использованием SVM существует возможность определить зависимости среди большого количества разнородных данных, что выделяет потенциал этого метода для поставленной задачи [14].

Все исследуемые модели были взяты к использованию из общедоступной библиотеки языка программирования Python «Scikit-learn».

Каждая модель МО уникальна и требует различных способов оценки её работы. Например, модели RF и SVM основаны на сложных вычислительных алгоритмах, которые трудно визуализировать. Таким образом, для получаемых результатов каждой модели необходимо подбирать индивидуальный подход в интерпретации.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Важность исследования заключается в оценке способностей представленных моделей классифицировать патологии на стандартных параметрах.

Результаты работы моделей описаны для каждого отдельного набора данных и созданных для них выборок.

A. Линейная регрессия

Набор параметров для обучения на каждой выборке включал в себя:

- fit_intercept = True.
- normalize = False.
- copy_X = True.
- n_jobs = -1.

Для данных GLCM и первой, второй и третьей выборках точность работы модели при тестировании составила 75%, 70% и 83%. Было выявлено, что модель опиралась на 5 основных радиомных характеристик из всего набора, таких как ClusteryTendensy, Contrast, JointAverage, SumAverage и SumSquares.

Для набора данных GLDM, точность работы модели на трех выборках составила 63 %, 52 % и 81 % соответственно. При интерпретации результатов обучения, было определено, что модель учитывала все содержащиеся в наборе данных радиомные характеристики, и выделить особенно важные из них для определения РЛ не удалось.

Для данных класса GLRLM модель показала результаты тестирования, равные 68 %, 68 % и 75 % для каждой из используемых выборок. Наиболее значимыми признаками набора для LR оказались LowGrayLevelRunEmphasis и ShortRunLowGrayLevelEmphasis. Стоит также отметить, что при классификации патологии на второй выборке, модель также опиралась на признаки LongRunEmphasis, RunLengthNonUniformityNormalized и RunVariance. Данные признаки оказались наиболее значимыми для определения РЛ.

Данные класса GLSZM модель успешно классифицировала на 70% для первой выборки, и 64% для второй и третьей выборок соответственно. При определении полученных результатов работы модели признаков, оказывавших особое влияние на определение РЛ выделить не удалось.

С данными из набора для класса NGTDM модель справилась хуже остальных, показав результаты в 51 %, 50 % и 49 % для каждой выборки тестового набора. Однако, для классификации РЛ модель значительно изменила параметр для признака Busyness, что стоит учитывать для следующих исследований в данной области.

На общем наборе данных модель не справилась с задачей классификации, показав близкие к нулю результаты для каждой выборки. Это связано в первую очередь с особенностями работы модели и слишком большим набором характеристик в наборе при малом их разнообразии.

B. Дерево решений

На заданных по умолчанию параметрах модель не показала достоверных результатов ни для одного из исследуемых наборов данных. В первую очередь такой

результат связан с переобучением модели, что является её ключевым недостатком. Модель имеет определенную необходимость в подборе оптимальных параметров под каждую задачу, что значительно затрудняет её использование в классификации РЛ.

C. Случайный лес

Набор параметров для обучения на каждой выборке включал в себя:

- n_estimators = 100.
- criterion = 'squared_error'.
- max_depth = None.
- min_samples_split = 2.
- min_samples_leaf = 1.
- min_weight_fraction_leaf = 0,0.
- max_features = 'auto'.
- max_leaf_nodes = None.
- bootstrap = True.
- oob_score = False.
- n_jobs = None.

Сложность интерпретации результатов модели заключается в том, что в принципе работы модели заложен алгоритм случайных значений. В связи с этим, результаты работы модели представлены как средние значения для 1000 итераций.

Результаты работы модели показали, что для данных набора GLCM средняя точность работы модели составила 77%, 79% и 61%, для GLDM – 61%, 65% и 61%, для GLRLM – 74%, 68% и 70%, для GLSZM – 58%, 51% и 55%, для NGTDM – 83%, 85% и 77%, а для общего набора данных – 82%, 76% и 57% для каждой из трех используемых в исследовании выборок.

Для классификации РЛ модель значительно изменила параметры для признаков ClusterShade и SumEntropy в наборе GLCM, GrayLevelVariance и LargeDependenceHighGrayLevelEmphasis для набора GLDM, GrayLevelNonUniformityNormalized, RunEntropy и RunLengthNonUniformity в наборе GLRLM. В наборе GLSZM модель выделила 8 признаков для РЛ, такие как GrayLevelNonUniformity, GrayLevelNonUniformityNormalized, LargeAreaEmphasis, LargeAreaLowGrayLevelEmphasis, LowGrayLevelZoneEmphasis, SizeZoneNonUniformity, ZoneEntropy и ZonePercentage. Среди данных из набора NGTDM модели не удалось выделить признаков, важных для классификации РЛ.

Стоит отметить, что модель использовалась на параметрах по умолчанию, поэтому часть деревьев в ансамбле могли быть подвержены переобучению, что усложняет интерпретацию результатов.

D. K-ближайших соседей

Набор параметров для обучения на каждой выборке включал в себя:

- n_neighbors = 5.

- weights = 'uniform'.
- algorithm = 'auto'.
- leaf_size = 30.
- p = 2.
- metric = 'minkowski'.
- metric_params = None.
- n_jobs = None.

Результаты работы модели на тестовых данных показали 67%, 50% и 66% точности для набора GLCM, 65%, 66% и 59% для GLDM, 57%, 60% и 56% для GLRLM, 63%, 60% и 70% для GLSZM и 73%, 73% и 72% для NGTDM. На общем наборе данных точность модели составила 66%, 62% и 70% для каждой выборки соответственно.

Среди признаков набора GLCM, можно выделить 3 наиболее важных для классификации РЛ признака, выделенных при интерпретации работы модели: Idn, InverseVariance и Contrast. Модель значительно изменила параметры для этих признаков. В наборе GLDM отличились признаки SmallDependenceHighGrayLevelEmphasis и GrayLevelVariance. Для GLRLM отличительными в поставленной задаче радиомными признаками оказались LowGrayLevelRunEmphasis, HighGrayLevelRunEmphasis и ShortRunLowGrayLevelEmphasis. Для набора GLSZM выделить ключевые признаки для поставленной задачи не удалось, каждый из признаков набора использовался моделью с незначительным отклонением параметров. Для набора NGTDM ключевыми признаками для выделения РЛ оказались Coarseness и Strength.

E. Метод опорных векторов

Набор параметров для обучения на каждой выборке включал в себя:

- kernel = 'rbf'.
- gamma = 'scale'.
- C = 1,0.
- shrinking = True.
- cache_size = 200.
- max_iter = -1.

Точность работы модели для набора данных GLCM составила 74%, 66% и 68% для каждой выборки. Среди всех признаков, особое внимание для выделения РЛ модель обратила на 7 из них: Imcl, ClusterTendensy, SumSquares, Idmn, SumAverage, JointAverage и Autocorrelation.

Для набора GLDM точность модели составила 79%, 65% и 73%. Наиболее значимыми признаками для класса РЛ оказались LargeDependenceEmphasis, DependenceVariance и GrayLevelNonUniformity.

В случае с набором данных GLRLM, точность работы модели составила 72%, 67% и 78%. Ключевыми признаками для выделения РЛ оказались RunEntropy, LongRunLowGrayLevelEmphasis, GrayLevelVariance, ShortRunEmphasis и HighGrayLevelRunEmphasis.

Точность работы модели для GLSZM составила 81%, 68% и 70%. Наиболее выделяющимися для классификации РЛ признаками оказались ZoneEntropy, GrayLevelVariance, SmallAreaHighGrayLevelEmphasis и LargeAreaLowGrayLevelEmphasis.

Для NGTDM точность модели показала одинаковые результаты, равные 79 % для всех трех выборок. Однако, среди всех признаков, модель значительно изменила параметры у Busyness, Strength и Coarseness при классификации РЛ, что может быть важно для дальнейших исследований.

На общем наборе данных результаты работы модели на тестовой выборке показали точность, равную 79 %, 72% и 74% для каждой из используемых в исследовании выборок.

V. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе описанного исследования был получен ряд важных результатов.

При сравнении работы LR выявлено, что модель испытывает трудности при работе с большим разнообразием признаков. Данный вывод сделан на основании данных о работе модели в наборе GLCM и общем наборе данных, где количество признаков значительно превышает объемы всех остальных выборок.

Для модели DT не удалось получить достоверных результатов на заданных по умолчанию параметрах. Модели требуется подбор оптимальных параметров для каждой задачи, в которой она используется. В противном случае происходит её переобучение, вследствие которого модель подстраивается под каждый поднабор данных в общей тренировочной выборке и не способна использовать полученные параметры для новых данных.

Модель RF показала в среднем высокие значения точности на тестовых выборках, однако, она может быть подвержена переобучению, из-за чего её использование в поставленной задаче становится более сложным и также, как в случае DT, требует подбора оптимальных параметров модели.

KNN показала достаточно высокие результаты только для набора данных NGTDM. Такие результаты связаны с количеством признаков в наборе, так как из данного класса РА извлекается всего пять различных признаков. Таким образом, в следующих исследованиях KNN стоит использовать для сравнения значимости признаков небольшими наборами этих признаков для достижения большей точности работы модели.

Модель SVM показала наилучшие результаты для первой выборки на каждом наборе данных, из чего можно сделать вывод, что для данного метода ключевым параметром является большое разнообразие данных каждого признака.

Среди выделенных ключевых признаков для классификации РЛ определено, что в наборе данных GLCM большинство моделей выделили такие признаки как ClustertyTendensy, Contrast, JointAverage, SumAverage и SumSquares. Для набора GLDM наиболее встречающимися среди результатов работы моделей МО оказался признак GrayLevelVariance. В наборе GLRLM значимыми признаками оказались

RunEntropy, ShortRunLowGrayLevelEmphasis и HighGrayLevelRunEmphasis. Среди признаков набора GLSZM, выделены такие, как LargeAreaLowGrayLevelEmphasis и ZoneEntropy. Набор NGTDM в свою очередь позволил выделить, что признаки Busyness, Strength и Coarseness важны для определения РЛ.

Выделенные в каждом наборе данных признаки необходимо исследовать более детально, так как они могут оказать влияние на выделение РЛ на изображениях КТ.

VI. Выводы

В ходе исследования были получены важные результаты в области использования моделей МО для радиомных характеристик с целью выявления РЛ на снимках КТ. Были выделены следующие особенности работы исследуемых моделей:

- Модель LR не подходит для использования на большом количестве признаков. Она может быть полезна при применении на небольших наборах признаков и имеет потенциал в выделении зависимостей среди них.
- DT требует тщательного подбора параметров перед обучением, что сильно затрудняет её использование в поставленной задаче.
- Модель RF показала высокие результаты в точности классификации на тестовых данных, однако из-за риска переобучения модели, она также требует подбора оптимальных параметров перед обучением.
- Модель KNN показала лучшие результаты для небольшого набора радиомных признаков. Таким образом, она имеет потенциал в исследованиях определения РЛ с помощью РА при условии разделения общего набора получаемых радиомных признаков на несколько поднаборов с частью этих признаков.
- Модель SVM в свою очередь показала наивысшую точность при большем разнообразии данных. Данная модель может быть использована для классификации РЛ на больших наборах данных.

Кроме того, не менее важной частью исследования стало выделение наиболее значимых для классификации РЛ радиомных признаков среди классов РА текстурных особенностей второго порядка. Важно детально исследовать выделенные ключевые признаки для улучшения классификации радиомных данных на КТ изображениях.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном исследовании были рассмотрены возможности использования различных моделей МО для классификации радиомных характеристик с целью выявления РЛ на снимках КТ. Исследование подтвердило потенциал использования МО для выявления РЛ на снимках КТ по признакам, которые находятся за пределами возможностей человеческого зрения. Кроме того, был выделен ряд трудностей, определяющих перспективы и потенциал развития темы исследования. Трудности заключаются в ограниченном количестве верифицированных данных, вариативности данных из разных источников, малой обучающей выборке и высоких требованиях к вычислительным мощностям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sulkowska U., Michalek I. M., Didkowska J., Koczkodaj P. Lung cancer and breast cancer mortality trends among 45-74 year-old European women // Nowotwory. – 2021. – Vol. 7, No. 4. – P. 185-196.
2. Мелдо А.А., Трофимова Т.Н., Кузнецов Е.М., Пономарев Н.А., Кучин И.А. Диагностика рака легкого и радиомика, современное состояние проблемы // Диагностическая и интервенционная радиология. – 2024. – Т. 18, № 2. – С. 35-39.
3. Мелдо А.А., Требушенков А.Ю. Системы искусственного интеллекта в диагностике очаговых образований в легких и перспективы их использования в скрининге рака легкого // Новые технологии в онкологии. – 2022. – С. 89-90.
4. Мелдо А.А., Уткин Л.В., Трофимова Т.Н. Новые подходы к разработке алгоритмов искусственного интеллекта в диагностике рака легкого // Лучевая диагностика и терапия. – 2019. – С. 8-18.
5. Чернина В.Ю., Беляев М.Г., Силин А.Ю. [и др.]. Диагностическая и экономическая оценка применения комплексного алгоритма искусственного интеллекта, направленного на выявление десяти патологических находок по данным компьютерной томографии органов грудной клетки // Digital Diagnostics. – 2023. – Т. 4, № 2. – С. 105-132. – DOI: 10.17816/DD321963. – EDN UGUJWJ.
6. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621103 Российской Федерации. MosMedData: КТ с признаками рака легкого: № 2023620619: заявл. 10.03.2023: опубл. 05.04.2023 / А.В. Владзимирский, В.П. Новик, Н.А. Павлов [и др.].
7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621253 Российской Федерации. MosMedData: НДКТ с признаками рака легкого: № 2023620623: заявл. 10.03.2023: опубл. 18.04.2023 / А.В. Владзимирский, А.Е. Андрейченко, И.А. Блохин [и др.].
8. Мелдо А.А. Разработка и внедрение системы искусственного интеллекта в лучевой диагностике очаговых образований в легких: специальность 31.25.00: дисс. ... д-ра мед. наук. – 2022. – 428 с. – EDN PWQQZX.
9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621198 Российской Федерации. База данных сегментированных на компьютерных томограммах новообразований легких (Annotated lung neoplasms dataset): № 2023620819: заявл. 28.03.2023: опубл. 13.04.2023 / В.В. Ананьев, А.Э. Ананьева, В.А. Макаров [и др.].
10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620232 Российской Федерации. База данных компьютерных томограмм грудной клетки с выделенными и маркированными областями патологии легких – LIRA (Lung Image Resource Annotated): № 2019620108: заявл. 31.01.2019: опубл. 07.02.2019 / Л.В. Уткин, М.А. Рябинин, А.А. Мелдо [и др.].
11. The New York Times. Doctors Wrestle With A.I. in Patient Care, Citing Lax Oversight [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nytimes.com/2023/10/30/health/doctors-ai-technology-health-care.html> (дата обращения: 18.06.2024).
12. Pyradiomics Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://pyradiomics.readthedocs.io/en/latest/features.html> (дата обращения: 18.06.2024).
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018666379 Российской Федерации. Программа классификации новообразований в легких с использованием метода хорд: № 2018663619: заявл. 30.11.2018: опубл. 17.12.2018 / М.А. Рябинин, Л.В. Уткин, А.А. Мелдо, А.А. Лукашин.
14. Домингос П. Верховный алгоритм. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 352 с.

Математическое моделирование роста злокачественных новообразований и разработка концепции предопухолевого состояния

Иванов Серафим Кириллович

Кафедра автоматики и процессов управления,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
им. В.И. Ленина «ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
s.k.ivanov314@gmail.com

Душин Сергей Евгеньевич

Кафедра автоматики и процессов управления,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
им. В.И. Ленина «ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
dushins@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена комплексному исследованию одной из моделей роста опухолевой массы. Ядром системы является динамика Ферхгольста, описывающая рост популяции при ограниченных ресурсах и объемах.

В ходе работы выявлены структурные особенности и динамические характеристики рассматриваемой модели. Предложена концепция предопухолевого состояния на основе варьирования параметров, применением которой может стать предсказание и предотвращение онкологических заболеваний.

Abstract. The work is dedicated to a comprehensive study of one of the tumor mass growth models. The core of the system is the Verhulst dynamics, which describes population growth under limited resources and volumes.

During the study, the structural features and dynamic characteristics of the model were identified. A concept of a pre-tumor state based on parameter variation has been proposed, which could be used for predicting and preventing oncological diseases.

Ключевые слова: математическое моделирование, медико-техническая система, устойчивость, бифуркация, динамические системы, онкология.

Keywords: Mathematical modelling, medical-technical system, stability, bifurcation, dynamical systems, oncology.

I. ВВЕДЕНИЕ

Медико-техническое моделирование – активно развивающаяся область, находящаяся на стыке математического моделирования и биологии (медицины).

Описание роста неоплазии математическим языком – во многом компромисс, подразумевающий предположение о существенности одних отличительных особенностей злокачественного роста и несущественности других. Основные отличительные особенности были выделены на рубеже веков Дугласом Ханаханом и Робертом Вайнбергом [1] (рис. 1).

Так исследуемая модель не описывает кровоснабжение новообразования (индуцирование ангиогенеза), а метастазы определяются как другие внешние модели (возможно, той же структуры).

Вместе с тем, любой биологический объект обладает изменчивостью (гетерогенностью, полиморфизмом и т.д.) и подвержен множеству внешних воздействий, что не позволяет строить долгосрочное моделирование с достаточной точностью без коррекции (возможно, структурной).

Ядром любой модели, направленной на описание злокачественных процессов, должна быть модель пролиферации – процесса деления и размножения клеток, разрастания тканей в ответ на эндогенный (внутриорганизменный) стимул.

Поскольку целью моделирования обычно ставится диагностика и/или предтерапевтическая оценка (прогноз) эффективности выбранной стратегии лечения, схема управления, на основе которой строится разработка, представляет автоматизированную модель, включающую как медицинский объект управления (опухоль), так и технические (диагностические средства) [2], рис. 2.

Лечащий врач должен контролировать все процессы, как биологические, так и технические, включая результат предсказания модели.



Рис. 1. Отличительные особенности злокачественного роста

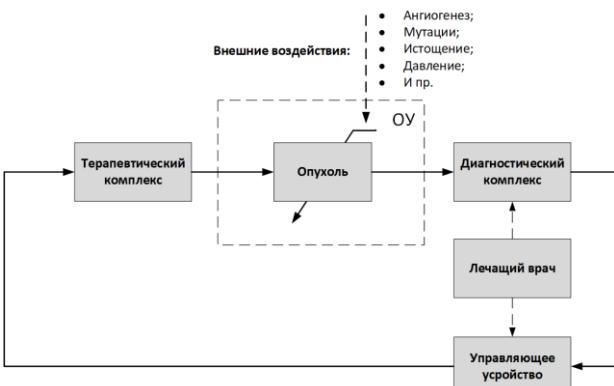


Рис. 2. Медико-техническая схема управления новообразованием

II. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ МОДЕЛИ

Работа посвящена исследованию модели, которая может быть описана системой нелинейных дифференциальных уравнений [3]:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \mu T \left(1 - \frac{T}{T_\infty}\right) - \alpha_1 ET, \\ \frac{dE}{dt} &= c(E_0 - E) - \alpha_2 ET, \end{aligned} \quad (1)$$

в которой:

T , ед. – объем опухолевой массы,

E , ед. – объем клеток-киллеров иммунной системы,

α_1 , [ед.· время] $^{-1}$ – параметр, отвечающий за скорость уничтожения опухолевых клеток эфекторными,

α_2 [ед.· время] $^{-1}$ – параметр, отвечающий за скорость гибели клеток-киллеров (эфекторных клеток), после их контакта с делящимися,

T_∞ , ед. – объем пространства роста (максимально возможный опухолевых клеток),

E_0 , ед. – номинальный объем эфекторных клеток иммунной системы, отвечающих за контроль популяции мутировавших клеток,

c , время $^{-1}$ – коэффициент, отвечающий за скорость поступления эфекторных клеток в пространство роста,

μ , время $^{-1}$ – коэффициент, отвечающий за скорость роста популяции опухолевых клеток,

причем все параметры неотрицательны.

Слагаемое $\mu T \left(1 - \frac{T}{T_\infty}\right)$ первого уравнения системы (1) представляет собой кинетику Ферхгольста, неоднократно использованную для математического описания пролиферации. С другой стороны, имеет место взаимодействие разнородных клеточных структур, влекущее за их собой взаимное уничтожение (скорости гибели зависят от параметров α_1 и α_2). Топология модели может быть представлена схематически (рис. 3).

III. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ

A. Поиск состояний равновесия системы

Состояния равновесия определяются путем решения системы нелинейных уравнений (2):

$$\begin{aligned} 0 &= \mu T \left(1 - \frac{T}{T_\infty}\right) - \alpha_1 ET, \\ 0 &= c(E_0 - E) - \alpha_2 ET. \end{aligned} \quad (2)$$

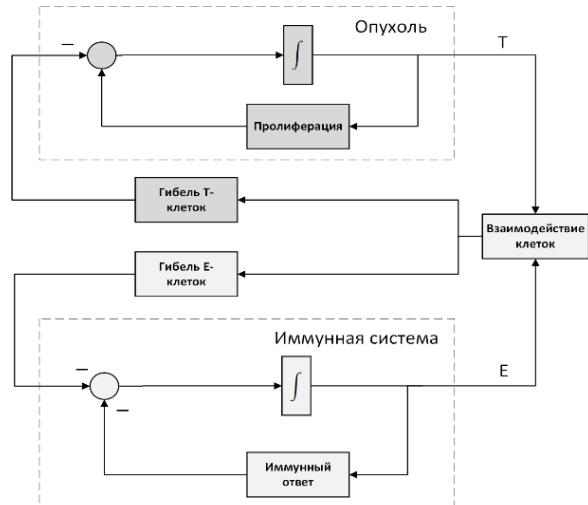


Рис. 3. Топология модели

Из первого уравнения находится одно из возможных значений для переменной состояний T

$$0 = T \left(\mu \left(1 - \frac{T}{T_\infty}\right) - \alpha_1 E\right) \rightarrow T = 0,$$

и подстановкой во второе уравнение E – координата:

$$0 = c(E_0 - E) \rightarrow E = E_0.$$

Теперь, исключив нулевое значение переменной T , допустимо деление на нее первого уравнения системы (2):

$$E = \frac{\mu}{\alpha_1} \left(1 - \frac{T}{T_\infty}\right).$$

Далее, подставляя во второе уравнение

$$T^2 + \left(\frac{c}{\alpha_2} - T_\infty\right) T - \frac{c}{\alpha_2} T_\infty \left(1 - \frac{\alpha_1 E_0}{\mu}\right) = 0, \quad (3)$$

что позволяет вычислить все оставшиеся точки равновесия системы дифференциальных уравнений (1).

Их количество зависит от знака дискриминанта уравнения (3):

$$D = \left(\frac{c}{\alpha_2} - T_\infty\right)^2 + 4 \frac{c}{\alpha_2} T_\infty \left(1 - \frac{\alpha_1 E_0}{\mu}\right).$$

В общем случае T – координаты точек равновесия определяются аналитическим решением квадратного уравнения (3). Таким образом, возможны варианты:

1) Единственная точка равновесия $(T, E) = (0, E_0)$, при этом уравнение (3) имеет только комплексные корни.

2) Точка равновесия $(T, E) = (0, E_0)$, точка равновесия, соответствующая кратному корню уравнения (3) ($D = 0$).

3) Точка равновесия $(T, E) = (0, E_0)$, две точки, соответствующие двум корням уравнения (3).

B. Характер и положение равновесных состояний

Наименьшее число зависимостей от параметров модели наблюдается для состояния равновесия $(0, E_0)$. Причем равенство T – координаты нулю демонстрирует отсутствие патологических клеток в организме. В реальном организме клетки-киллеры и опухолевые клетки находятся в динамическом равновесии, поддерживающем объем последних на допустимом (безвредном для организма) уровне. Подобное поведение может быть интерпретировано как динамика модели с начальными условиями $v_0 = (E, T) = (\varepsilon, E_0)$, где ε – малый объем опухолевых клеток, причем состояние равновесия $(0, E_0)$ (далее – «здоровое» состояние равновесия) устойчиво «в малом».

В данном случае, для исследования устойчивости, достаточно первого метода Ляпунова. Действительно, при линеаризации вблизи «здорового» положения равновесия, матрица Якоби имеет вид

$$J_0 = \begin{pmatrix} \mu - \alpha_1 E - \frac{2\mu}{T_\infty} T & -\alpha_1 T \\ -\alpha_2 E & -\alpha_2 T - c \end{pmatrix} \Big|_{T=0, E=E_0} = \begin{pmatrix} \mu - \alpha_1 E_0 & 0 \\ -\alpha_2 E & -c \end{pmatrix},$$

а ее характеристический полином

$$\det(J_0 - \lambda I) = (\mu - \alpha_1 E_0 - \lambda)(-c - \lambda) = 0,$$

откуда для устойчивости «в малом» требуется выполнение неравенства

$$\mu < \alpha_1 E_0, \quad (4)$$

то есть собственные числа λ матрицы Якоби отрицательны. С медицинской точки зрения, условие интерпретируется следующим образом: если скорость роста аномальных клеток не превышает скорости их уничтожения, то организм способен самостоятельно удерживать объем патологических клеток ниже опасного для него уровня.

При условии, что дискриминант уравнения (3) отрицателен, условие (4) является и условием асимптотической устойчивости в целом (рис. 4). Иначе, исследования устойчивости «в большом» требует исследования оставшихся положений равновесия.

Дополнительный анализ показывают, что тип особой точки при выполнении (4) – устойчивый узел, иначе – седло.

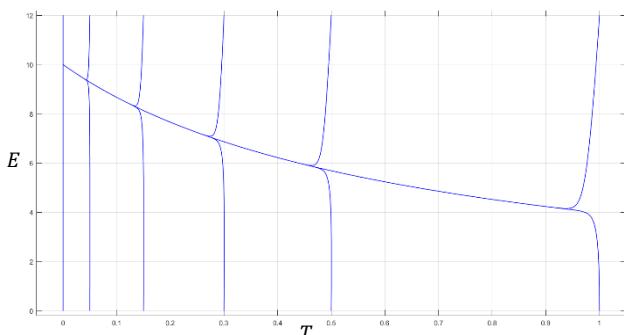


Рис. 4. Фазовый портрет для устойчивости в целом

Если окажется, что дискриминант уравнения (3) положителен $D > 0$, то принципиален знак T -координаты каждого из найденных стационарных состояний.

Во-первых, обе координаты могут оказаться отрицательными. Это возможно, если

$$\begin{aligned} D &> 0, \\ \frac{c}{\alpha_2} &> T_\infty, \\ \mu &< \alpha_1 E_0, \end{aligned}$$

причем большая по модулю из координат соответствует особой точке типа «устойчивый узел», а меньшая – «седло». Фазовый портрет продемонстрирован в табл. 1 под номером 3. Тем не менее, подобная конфигурация модели неинтерпретируема в медицинской области в силу невозможности отрицательности объемов, возникающих в исследовании. Выкладки могут оказаться важными только при сближении неустойчивого положения равновесия с устойчивым «здравым» положением в рамках концепции «предопухолового» состояния (см. С. Динамика корней и предопухоловое состояния).

Во-вторых, при выполнении совокупности условий

$$\begin{aligned} D &> 0, \\ \frac{c}{\alpha_2} &< T_\infty, \#(5) \\ \mu &< \alpha_1 E_0, \end{aligned}$$

оба положения равновесия окажутся в первой четверти фазового пространства. Матрица Якоби

$$J = \begin{pmatrix} -\frac{\mu}{T_\infty} T & -\alpha_1 T \\ -\alpha_2 \frac{\mu}{\alpha_1} \left(1 - \frac{T}{T_\infty}\right) & -\alpha_2 T - c \end{pmatrix}$$

вблизи большего из корней уравнения (3) будет иметь отрицательные собственные числа при справедливости условий

$$\begin{aligned} \det(J) &= \mu \cdot \frac{T_r}{T_\infty} (-\alpha_2 T_\infty + 2\alpha_2 T_r + c) > 0, \\ Tr(J) &= T_r \left(-\frac{\mu}{T_\infty} - \alpha_2\right) - c < 0, \end{aligned}$$

где

$$T_r = \frac{T_\infty - \frac{c}{\alpha_2} + \sqrt{\left(T_\infty - \frac{c}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4T_\infty c}{\alpha_2} \left(\frac{\alpha_1 E_0}{\mu} - 1\right)}}{2},$$

Но вследствие второго из предъявленных требований совокупности (5) $T_r > 0$, т.е. $Tr(J) < 0$ при любых параметрах.

Для определителя:

$$\begin{aligned} -\alpha_2 T_\infty + 2\alpha_2 T_r + c &> 0, \\ -\alpha_2 T_\infty + 2\alpha_2 \left(\frac{T_\infty - \frac{c}{\alpha_2} + \sqrt{\left(T_\infty - \frac{c}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4T_\infty c}{\alpha_2} \left(\frac{\alpha_1 E_0}{\mu} - 1\right)}}{2} \right) + c &> 0, \end{aligned}$$

$$\alpha_2 \sqrt{\left(T_\infty - \frac{c}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4T_\infty c}{\alpha_2} \left(\frac{\alpha_1 E_0}{\mu} - 1\right)} > 0,$$

что справедливо.

То есть равновесное состояние, соответствующее большему из корней (по модулю), всегда устойчиво при выполнении (5).

Дополнительный численный анализ показывает, что характер особой точки – «устойчивый узел».

Для меньшего (по модулю) из корней T_{rmin} положительность дискриминанта матрицы Якоби перестает выполняться:

$$-\alpha_2 T_\infty + 2\alpha_2 T_r + c > 0,$$

$$-\alpha_2 \sqrt{\left(T_\infty - \frac{c}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4T_\infty c}{\alpha_2} \left(\frac{\alpha_1 E_0}{\mu} - 1\right)} > 0,$$

что ложно ($\alpha_2 > 0$). Характер особой точки – «седло».

Следует отметить, что при подобной конфигурации явным образом прослеживается область притяжения здорового равновесного состояния (см. таблицу 1 пункт 2):

$$\Omega = \{(T, E) \mid T < T_{rmin}\}. \quad (6)$$

ТАБЛИЦА 1. Конфигурации модели

Номер	Условие	T -координаты равновесных состояний	Фазовый портрет	Устойчивость
1.	$\mu > \alpha_1 E_0$.			$(0, E_0)$ – устойчивый узел.
2.	$\begin{cases} \mu < \alpha_1 E_0, \\ \frac{c}{\alpha_2} < T_{rmin}, \\ D > 0. \end{cases}$			$(0, E_0)$ – устойчивый узел. Болезнь по модулю из оставшихся точек – устойчивый узел, меньшая (по модулю) – седло.
3.	$\begin{cases} \mu < \alpha_1 E_0, \\ \frac{c}{\alpha_2} > T_{rmin}, \\ D > 0. \end{cases}$			$(0, E_0)$ – устойчивый узел. Большая по модулю из оставшихся точек – устойчивый узел, меньшая (по модулю) – седло.

То есть если объем опухолевой массы превышает некоторый заданный критический объем T_{rmin} , организм теряет способность бороться с заболеванием. Чем ближе T_{rmin} к началу координат (то есть T -координате «здорового» равновесного состояния), тем меньший объем опухоли организм способен стабилизировать. Тогда за меру риска образования патологий на языке исследуемой модели следует принять величину, обратную евклидовому расстоянию $d(T_{rmin}, 0)$:

$$m(T_{rmin}) = \frac{1}{\mathbf{1}_{\{\mu < \alpha_1 E_0\}} \cdot d(T_{rmin}, 0)} =$$

$$= \frac{1}{\mathbf{1}_{\{\mu < \alpha_1 E_0\}} \cdot \sqrt{[Re(T_{rmin})]^2 + [Im(T_{rmin})]^2}},$$

где $\mathbf{1}_{\{\mu < \alpha_1 E_0\}}$ – индикатор устойчивости $(0, E_0)$, а комплексность метрики обусловлена обобщением рассуждений на случай отрицательности дискриминанта или на-

личие кратных корней (равенство дискриминанта нулю). Наконец, последний вариант – корни уравнения (3) разных знаков.

Для этого необходимо (и достаточно), чтобы не выполнялось (4), т.е. $\mu > \alpha_1 E_0$. Из общих соображений, известных в теории динамических систем, оба равновесных состояния, соответствующих полученным T -координатам, должны быть устойчивыми. Более строгое доказательство полностью повторяет рассуждения, приведенные выше для обеих положительных T -координат. Фазовый портрет приведен в табл. 1 под пунктом 1. Подобный случай описывает неспособность организма бороться со сколь угодно малыми объемами опухолевых тканей: для любых начальных условий $T(t) \rightarrow T_\infty$.

При рассмотренных патологических конфигурациях целью управления может являться (от наиболее к наименее существенной):

- 1) Полная ремиссия: $T(t) \rightarrow 0$.
- 2) Стабилизация объема опухоли: $dT/dt \rightarrow 0$.
- 3) Стабилизация роста опухоли: $d^2T/dt^2 < 0$.

C. Динамика корней и предопухолевое состояние

Особый интерес представляет возможность перехода системы из одной конфигурации к другой путем варьирования параметров.

Во избежание потери стационарности модели, скорость изменения параметров во времени предполагается значительно меньше скорости роста новообразования. Тогда путем сглаживания малых дискретных изменений можно в каждый момент времени рассматривать модель как новую систему с ее уникальными структурными и динамическими характеристиками.

«Здоровое» равновесное состояние, в отличие от патологических, обладает всего одной степенью свободы – варьированием параметров (а именно – изменением E_0) можно добиться только ее движения вдоль оси ординат (оси клеток-киллеров E).

Следует исходить из предположения, что здоровый организм соответствует модели со «здравым» состоянием, устойчивым «в целом». Тогда появление патологий возможно только путем таких вариаций параметров, которые изменят знак дискриминанта D . Причем появление новых (патологических) равновесных состояний возможно как в правой полуплоскости фазового пространства (переход от портрета 4 к портрету 2 из табл. 1), так и в левой полуплоскости (переход от портрета 4 к портрету 3). Несмотря на то, что любой из переходов сопровождается локальной бифуркацией по причине слияния устойчивого «узла» с (неустойчивым) «седлом», устойчивость «здравого» состояния (устойчивого «узла») «в малом» не меняется.

Тем не менее, подобные изменения сказываются на качестве процессов в худшую сторону – рис. 5. Такая динамика может быть интерпретирована как «предопухолевые» процессы, а состояние модели, при котором помимо устойчивого «здравого» равновесного состояния присутствуют два патологических – «предопухолевые» состояния.

Чем ближе оказывается меньшая по модулю T -координата патологического состояния равновесия, тем более затянутыми оказываются переходные процессы, направленные на уменьшение объема опухолевой массы.

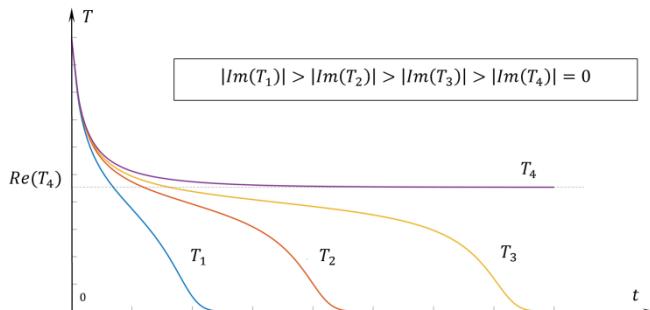


Рис. 5. Переходные процессы при различных мнимых частях решения

Если окажется, что обе – T -координаты патологических состояний отрицательны, заметных изменений в качестве процессов не будет заметно.

Переходы равновесных состояний из левой неинтерпретируемой полуплоскости пространства корней уравнений (3) в правую (интерпретируемую) возможен только по траекториям, представленным на рис. 6 (либо каким-либо комбинациям описанных движений). При этом, если траектория проходит через начало координат (T -координату здорового равновесного состояния) имеет место «обмен» устойчивостями состояния, пересекающего начало координат, со «здоровым» состоянием. То есть осуществляется трансформация от конфигурации 3 в конфигурацию 2 из табл. 1, что соответствует траектории T -области с рис. 6 (3). Далее возможен переход в конфигурацию 2 – траектория рис. 6 (1).

Бесконечная чувствительность для кратных T -координат приводит к тому, что незначительные изменения параметров значительно изменят поведение модели. С медицинской точки зрения это отвечает критическим показаниям анализов, которые, зачастую, не дают точный ответ о реальном состоянии организма пациента. Здесь требуются дополнительные, более тонкие исследования в обеих областях.

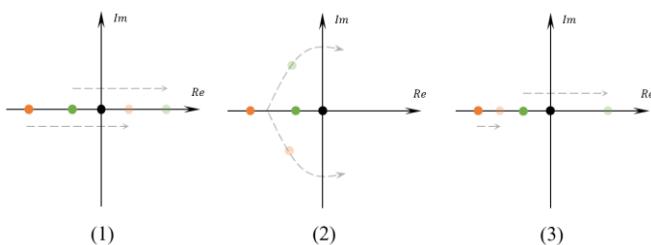


Рис. 6. Траектории особых точек в комплексной плоскости T

Если бифуркация наблюдается в правой полуплоскости фазового пространства, или путем различных изменений параметров оба патологические состояния равновесия оказываются в правой полуплоскости, развитие заболевания обуславливается выпадением положения системы $v = (E, T)$ из области притяжения «здорового» равновесного состояния Ω (6).

Это возможно при достаточно малом T_{rmin} :

$$T_{rmin} < \varepsilon,$$

где ε – средний объем патологических клеток, присущий здоровому организму. Сближение T_{rmin} с нулем показано на рис. 7. Изображенные движения демонстрируют сближение μ с произведением $\alpha_1 E_0$, или

$$\frac{d(\alpha_1 E_0 - \mu)}{dt} < 0.$$

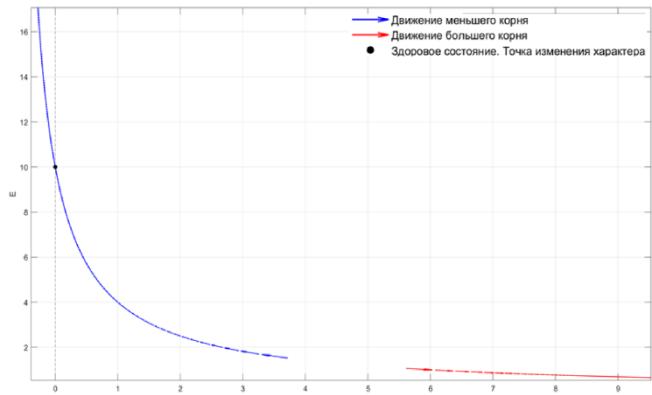


Рис. 7. Траектории состояний равновесия на фазовой плоскости

По аналогии с переходами из левой полуплоскости в правую, через касание неустойчивого патологического равновесного состояния со «здравым» происходит «обмен» устойчивостями, т.е. конфигурация 1 сменяет конфигурацию 2 (см. табл. 1).

Определение реальных значений изменения параметров и уровня риска $m(T_{rmin})$ возможно только путем многократных замеров данных (анализов) пациентов, с медицински обоснованной угрозой образования злокачественной опухоли (возможно, пациенты с риском рецидива при полной ремиссии после предыдущей терапии).

Все описанные движения проще пронаблюдать на диаграмме положений равновесия α_2 (α_1) – рис. 8.

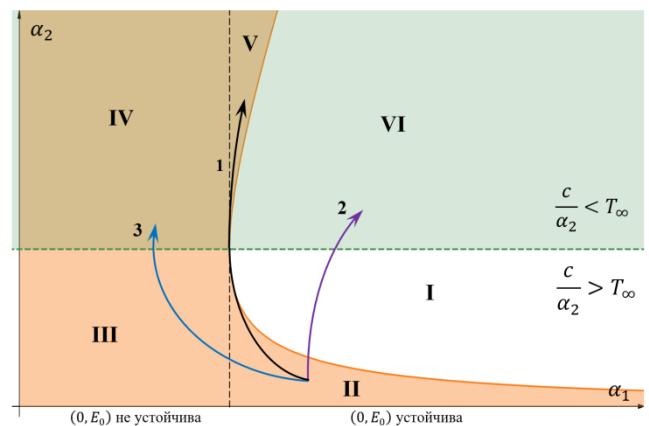


Рис. 8. Диаграмма положений равновесия

Заштрихованная область под гиперболой соответствует положительности дискриминанта уравнения (3), а траектории, изображенные стрелками – переходам в комплексной T -области из рис. 6. Единственная точка касания прямой $\alpha_1 = \frac{\mu}{E_0}$ и гиперболы иллюстрирует неизбежность бифуркации при возникновении корней в правой полуплоскости фазового пространства.

IV. Выводы

В ходе исследования выявлены ключевые особенности рассматриваемой математической модели роста неоплазии.

Обоснование существования трех равновесных состояний заключается в способности модели описывать как здоровые процессы в организме, так и патологические (развитие заболевания или предопухолевое состояние). Варьирование параметров способно значительно изменить характер процессов, а при определенных условиях модель обладает бесконечной чувствительностью.

Определение параметров модели возможно частично иммуногистохимическими анализами – например, индекс пролиферативной активности по экспрессии Ki-67 коррелирует с коэффициентом агрессивности новообразования μ [4] и частично методами подгонки кривой (curve fit).

Разработанная концепция предопухолевого состояния основывается на возможности переведение модели из конфигурации, в которой «здоровое» состояние равновесия асимптотически устойчиво «в целом» в конфигурацию, для которой наблюдается ограниченная область притяжения «здорового» равновесного состояния.

Безусловно, определение параметров для модели, описывающей «предопухолевое» состояние организма крайне затруднительно, тем не менее, полученные результаты не противоречат медицинским представлениям об образовании злокачественных опухолей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hanahan D., Weinberg R. The hallmarks of cancer. – Текст: непосредственный // Cell. – 2000. –Vol. 100, No. 1. – P. 57-70.
2. Душин С.Е, Мелдо А.А., Графина О.А., Шпаковская И.И. Применение методов теории управления в онкологии. – Текст: непосредственный // V Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2023), Санкт-Петербург; 26–28 сентября 2023 г.: Сборник докладов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – С. 168-171.
3. Гончарова А.Б, Василевская Е.В., Колпак Е.П., Виль. М.Ю. Математическое моделирование лечения онкологического заболевания. – Текст: непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – Вып. 3 (117). – С. 13-21.
4. John Pieter Jr1, William Hamdani, Berti Julian Nelwan, Muhammad Faruk The Association Between Ki-67 and P53 Expression with Histopathological Grading in Breast Cancer: A Cross-Sectional. – Текст: непосредственный // Surgery Gastroenterology and Oncology. – 2022. – March. – P. 1-8.

Задача автоматической классификации сегментов в изображениях

Писарев Андрей Сергеевич

Кафедра автоматики
и процессов управления
Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
a_pisarev@mail.ru

Писарев Иван Андреевич

Кафедра информационных систем
Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
pisarevivan@yandex.ru

Котова Елена Евгеньевна

Кафедра автоматики
и процессов управления
Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
eekotova@gmail.com

Кафедра клинической психологии
«Санкт-Петербургский
государственный педиатрический
медицинский университет»
Министерства здравоохранения
Российской Федерации
Санкт-Петербург, Россия
eekotova@gmail.com

Аннотация. Распознавание изображений срезов, получаемых с помощью снимков КТ/МРТ, является трудоемкой задачей для специалистов экспертов-медиков. Специальные методы автоматической классификации с применением алгоритмов машинного обучения существенно сокращают временные затраты при ручной разметке и способствуют улучшению показателей точности и интерпретируемости принятых решений относительно нормы и патологий в изображениях.

Abstract. CT/MRI imagery is a time-consuming task for medical experts. Special automatic classification methods using machine learning algorithms significantly reduce the time required for manual marking and improve the accuracy and interpretability of decision-making regarding norms and image pathologies.

Ключевые слова: сегментация изображений, классификация, методы машинного обучения

Keywords: *image segmentation, classification, machine learning methods*

I. ВВЕДЕНИЕ

В результатах исследований при решении задач классификации сегментов изображений, полученных на ограниченных объемах данных КТ/МРТ, показано, что вопросы одновременного обеспечения показателей точности и производительности продолжают оставаться недостаточно исследованными [1].

Актуальность данной задачи обосновывается увеличением объемов данных и ограниченной производительностью экспертов-врачей. При ручной разметке сегментов численностью от нескольких десятков до более од-

ной тысячи срезов (slice) в зависимости от случаев исследования требуется приблизительно затратить около одного часа времени, например, для анализа и распознавания снимков, относящихся к изображениям нормы и патологии аорты, артерий и сосудов человека [1, 2].

В докладе рассматривается задача автоматической классификации с использованием методов машинного обучения при обеспечении точности в отсутствии существенных отклонений от нормы не менее 80%, и при существенных отклонениях не менее 60%.

II. ТРЕБОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Требуемая производительность распознавания 3D изображений с применением обученных моделей классификации – ориентировочно не менее 50 результатов МРТ/КТ в день.

Международный стандартный формат цифровой визуализации и обмена изображениями, который используется для хранения и передачи информации в медицине, обозначается DICOM, Digital Imaging and Communications in Medicine (<https://www.dicomstandard.org/>).

При восьмичасовом рабочем дне врачу должна быть предоставлена возможность приблизительно за 10 минут получать 3D модель сосудов, артерий и аорты на основе DICOM файла в результате КТ/МРТ обследования пациента.

Результатами работы модуля загрузки исходных данных являются:

- метаданные, описывающие в текстовом виде информацию из файлов DICOM;

- массивы пикселей, кодирующих степень поглощения тканями тела излучения в установке (рентгеновского в КТ и магнитного в МРТ).

Метаданные отображаются в виде текстового описания, а массивы пикселей (pixel data) преобразуются в 2D изображения.

Пример изображения исходных данных в формате DICOM приведен на рис. 1.

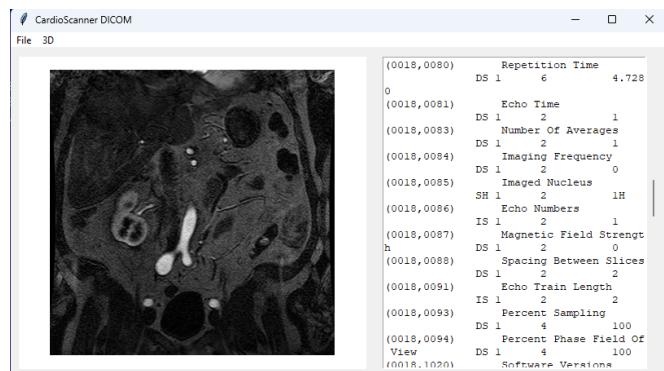


Рис. 1. Визуализации изображений исходных данных в формате DICOM

III. Обучение модели классификации

Для решения задачи обучения модели классификации был применены наборы данных AVT (Aortic Vessel Tree), состоящие из трех частей, обозначаемых RIDER (R), KITS (K), Dongyang (D) [3]. Наборы данных были получены с помощью компьютерной томографии-ангиографии (КТА), и каждое сканирование охватывает восходящую аорту, дугу аорты и ее ветви в области головы/шеи, грудную аорту, брюшную аорту и нижнюю часть брюшной аорты, с разветвлением подвздошных артерий.

В наборе содержатся исходные изображения КТА и эталонные сегментированные изображения, размеченные вручную специалистами.

Данные представлены в формате NRRD (Nearly Raw Raster Data Format) и могут быть исследованы в интерактивном режиме в программном средстве 3D Slicer (<https://www.slicer.org>) с открытым исходным кодом. Платформа 3D Slicer предназначена для решения исследовательских проектов по обработке изображений с упором на клинические и биомедицинские приложения.

Для преобразования файлов набора данных AVT в файлы контрастных изображений и масок сегментов аорты, артерий и сосудов разработаны программные модули библиотеки «Кардиосканер».

В наборах AVT включено общее число срезов (slice) более 56000 КТА (аорта, артерии). Общий размер набора составляет 9.85 Гб. В AVT содержится 56 наборов данных, полученных в процессе исследований КТА как здоровых пациентов, так и пациентов с подтвержденными диагнозами патологий различных типов: расслоения аорты (AD) и аневризмы аорты (AAA).

В зарубежных исследовательских центрах на основе включенного в пул исходных данных набора AVT получены результаты успешного применения методов искусственного интеллекта для решения задач сегментации изо-

брожений КТ/МРТ и распознавания элементов кровеносной системы, а также формирования 3D модели и обнаружения патологий (например, аневризмы аорты) [2, 4–7]. В публикациях в основном описываются результаты сегментации с применением моделей глубокого обучения.

Использование объема более 56000 срезов размером 512x512 пикселей КТА в качестве обучающей и тестовой выборки является основой для получения оценки точности распознавания. Для обучения моделей сверточных нейронных сетей и сегментации изображений на их основе разработана библиотека программ «Кардиосканер» и инструментальных средств с графическим интерфейсом.

При помощи разработанных программ были подготовлены обучающие и тестовые выборки, характеризующие контрастные изображения и дополненные соответствующими им бинарными признаками из эталонных изображений масок сегментов кровеносной системы (аорта, артерии, сосуды). Используется обозначение f (front), если пиксель в маске относится к сегменту кровеносной системы (интенсивность пикселя 255) и b (background), если пиксели принадлежат фону (интенсивность пикселя равна 0).

Для исследования моделей классификации применялись различные методы интеллектуального анализа данных: глубокого обучения (Deep Learning), деревьев решений, леса решений (Dtree, RF), AdaBoostM1 и др.

В качестве инструментального средства использовалось кроссплатформенное программное обеспечение WEKA с открытым кодом, позволяющее настраивать перечисленные модели машинного обучения в программном интерфейсе [8].

Для применения методов глубокого обучения были разработаны инструментальные средства с визуальным интерфейсом, позволяющие пользователям непрограммистам разрабатывать модели сверточных нейронных сетей и исследовать модели: осуществлять распознавание сегментов кровеносной системы (сегментация в режиме предсказания), производить оценку точности и получать визуальные изображения. Отличительными особенностями разработанных инструментальных средств являются:

- визуальный интерфейс приложения для создания моделей машинного обучения и приложения для применения моделей к новым наборам изображений;
- обеспечение интуитивно понятной компоновки;
- использование многопоточной обработки для предотвращения «зависания» пользовательского интерфейса во время трудоемкого процесса сегментации;
- реализация гибкой обратной связи в ходе загрузки данных, обучения модели и оценки точности;
- отображение как визуальных (изображения сегментации), так и числовых (потери и точность) результатов.

Разработанные инструментальные средства являются кроссплатформенными, предназначенными для работы в операционных системах Windows и Linux.

Результаты классификации сегментов с применением моделей машинного обучения и библиотеки WEKA на наборах данных R6 (AAA – аневризма брюшной аорты) со значениями пикселей 1063 изображений срезов размером 512x512 при делении таблицы данных на обучающую (70%) и тестовую (30%) выборки, показали, что требуемую точность распознавания обеспечивают методы:

- глубокого обучения (80.4%);
- деревьев решений (99.6%);
- случайного леса (99.7%);
- AdaBoostM1 (91.7%).

При использовании обученной модели (на примере набора данных R6) для классификации пикселей маски набора данных R1 из набора данных RIDER (норма, без патологий) [3], получена точность 87.4% (методом AdaBoostM1).

Время подготовки таблицы тестовых данных, распознавания значений пикселей сегментов вместе с формированием 3D изображения и моделированием составило менее 5 минут.

Было проведено исследование данных с увеличенным числом информативных признаков. Обучение проводилось на совместных наборах R4, R3 из набора данных RIDER (тысяча срезов) [3]. Данные были разделены на обучающую (70%) и тестовую (30%) выборки. Методом AdaBoostM1 получена модель с точностью классификации (сегментации) тестового набора 96.3%.

При этом, доля правильно предсказанных границ сегментов (TP) составляет 0.998, а доля ошибок (FP) составила 0.085. Эти ошибки проявляются как точечный шум, который на этапе постобработки удаляется из предсказанных масок с помощью фильтра.

Показатели точности модели для реконструкции пикселей сегментов масок срезов:

$$P = \frac{tp}{tp + fp}; R = \frac{tp}{tp + fn}; A = \frac{tp + tn}{tp + tn + fp + fn};$$

$$F = \frac{1}{\alpha \frac{1}{P} + (1-\alpha) \frac{1}{R}} = \frac{(\beta^2 + 1) PR}{\beta^2 P + R}; F_1 = \frac{2PR}{P + R},$$

где P – точность (precision); R – полнота (recall) или чувствительность (sensitivity); A – правильность (accuracy); F – F-мера (F-measure);

$\beta^2 = \frac{1-\alpha}{\alpha}$, $\alpha \in [0,1]$, $\beta^2 \in [0, \infty]$; F_1 – сбалансированная F-мера (balanced F-measure) при $\alpha = 0.5$, $\beta = 1$; MCC – мера качества бинарной классификации, корреляционный коэффициент (Matthews correlation coefficient); tp – истинно положительные (true positives); tn – истинно отрицательные (true negatives); fp – ложно положительные (false positives); fn – ложно отрицательные (false negatives) (рис. 2) [9].

Значения некоторых показателей точности приведены в табл. 1.

При оценке точности реконструкции изображений масок срезов по модели сегментации также используются критерии точности DICE similarity Coefficient (DSC), коэффициент Жаккара IoU, что позволяет производить сравнение точности распознавания с другими результатами, известными из публикаций. DSC определяется как двукратное число элементов пересечения двух множеств, разделенных на сумму количества элементов в каждом наборе.

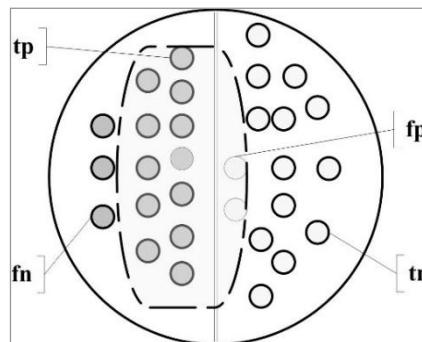


Рис. 2. Показатели точности модели классификации tp,fp,fn,tn

ТАБЛИЦА 1. ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИ СЕГМЕНТАЦИИ ТЕСТОВОГО НАБОРА

Класс	TP	FP	P	F	MCC
background	0.914	0.002	0.998	0.914	0.954
front	0.998	0.086	0.922	0.998	0.958
average	0.957	0.044	0.960	0.957	0.956

Полученная модель была применена к наборам данных с общим объемом более 17 миллионов примеров (samples), описывающих принадлежащие сегментам маски пикселей. Минимальная точность классификации превышала 80% для примеров КТ/МРТ.

IV. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ

Решение поставленной задачи включает три группы функций.

1. Загрузка и отображение исходных данных МРТ/КТ:
 - загрузка информации из DICOM;
 - визуализация данных МРТ/КТ, представленных в формате DICOM;
 - презентация серии 2D изображений и метаданных МРТ/КТ пациента, представленных в формате DICOM;
 - анонимизация, защита персональные данные, содержащихся в метаданных DICOM пациентов, для последующей обработки;
 - архивирование данных МРТ/КТ пациента.

2. Распознавание изображений, выделение элементов кровеносной системы, формирование и визуализация 3D модели:

- предобработка 2D изображений (фильтрация, размытие, выделение границ, масштабирование, извлечение признаков, формирование маски);
- регистрация;
- сегментация;

- маскирование изображений;
- преобразование серии 2D изображений в 3D модели (STL, STEP, VTK);
- визуализация 3D моделей.

3. Виртуальное моделирование и визуализация полученных результатов:

- ввод параметров кровеносной системы;
- виртуальное моделирование;
- визуализация полученных результатов.

Разработанное программное обеспечение позволяет решать задачу распознавания изображений с требуемой точностью и скоростью.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация разработанного программного обеспечения производилась на свободно распространяемом наборе данных Aortic Vessel Tree (AVT). Целью апробации являлась автоматическая сегментация изображений КТА с помощью моделей машинного обучения, оценка точности и производительности разработанного программного обеспечения, распознавание и визуализация 3D изображений.

С применением разработанных авторами инструментальных средств глубокого обучения и библиотеки программ «Кардиосканер» решены задачи автоматической сегментации изображений, полученных в результате исследования пациентов с помощью компьютерной томографии с ангиографией (КТА).

Разработаны модели машинного обучения для автоматического распознавания в изображениях аорты, артерий и сосудов кровеносной системы.

С помощью инструментального средства глубокого обучения разработана модель сверточной нейронной сети (U-Net). Разработанная модель применена для бинарной классификации пикселей в изображениях КТА на принадлежность сегментам сердечно-сосудистой системы. Набор данных AVT был разделен на обучающую (70%) и тестовую (30%) выборки.

Средняя точность распознавания сегментов аорты в изображениях масок тестовой выборки, оцениваемая на основе коэффициента подобия и коэффициента Жаккара составила:

- коэффициент подобия предсказанных и эталонных изображений DSC (DICE similarity coefficient): 0.85;
- коэффициент Жаккара (IoU similarity coefficient): 0.74; Точность пикселей: 0.999.

С помощью разработанных программ и библиотеки WEKA были сформированы модели глубокого обучения (Deep Learning), деревьев решений, леса решений (Dtree, RF), AdaBoostM1 с использованием обучающей выборки, составляющей 70% от набора данных. С применением обученной модели AdaBoostM1 средняя точность распознавания сегментов аорты в изображениях тестовой выборки составила:

- DSC: 0.88;
- точность пикселей: 0.999.

Время распознавания 3D изображений с использованием моделей машинного обучения в среднем не превышает 5 мин.

Создание 3D изображения на основе масок сегментов состоит из четырех этапов.

1 этап. Преобразование массива изображений срезов в 3D массив облака точек (point cloud). Выполняется с помощью программы «aorta_read». В качестве параметра программы указывается путь к папке с изображениями масок в формате TIFF («predict_mask»). В режиме постобработки предусмотрена фильтрация шума (единичных пикселей) в 2D изображениях масок. Результатом является файл 3D массива в формате «.пру» библиотеки Python «пнитру». Возможно сохранение массива в виде тензора в формате «.pth» библиотеки «pytorch».

2 этап. Формирование облака точек и поверхности 3D фигуры с использованием 3D массива в формате «.пру» и дополнительных параметров: расстояний между пикселями в миллиметрах по осям x, y, z трехмерного изображения. Выполняется с помощью программы «aorta_write». Предусмотрена возможность сохранение файла облака точек в формате «.XYZ». Результатом является 3D изображение поверхности (mesh) в формате «PLY», которое сохраняется в папке «tmp/3d2».

3 этап. Постобработка, которая включает сглаживание поверхности, удаление артефактов (отдельных, не связанных с деревом сосудистой системы небольших фрагментов). Также для подготовки к моделированию может быть сформирована версия 3D изображения, в котором крайние отверстия в полых «трубках» аорты и артерий закрыты (close) плоскими поверхностями («крышками»).

4 этап. Преобразование 3D изображения из формата «PLY» в форматы «STL/STEP/VTK».

Пример визуализации реконструированного изображения аорты и артерий из набора данных результатов КТА пациента без патологий изображен на рис. 3.

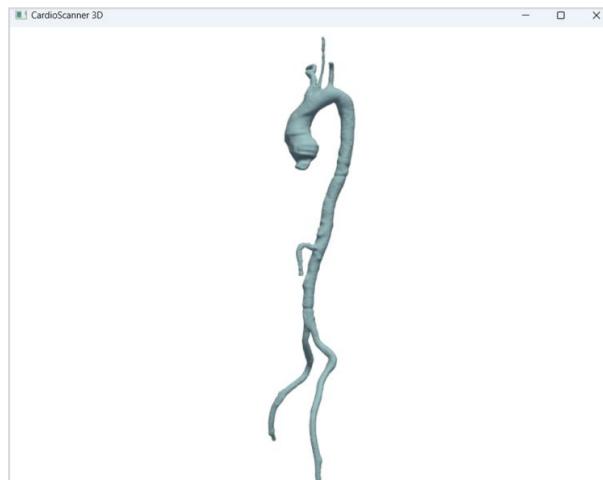


Рис. 3. Визуализации изображения, распознанного с помощью модели машинного обучения

Визуализация 3D сегмента изображения аорты по данным КТА пациента с патологией аневризмы аорты (Abdominal Aortic Aneurysm, AAA) изображена на рис. 4. При реконструкции использована модель, обученная на наборе данных пациентов без патологий.

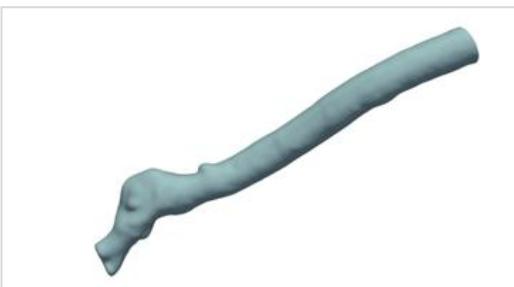


Рис. 4. Визуализация утолщения в нижней части сегмента 3D изображения аорты

В сформированном 3D изображении был оценен диаметр участка аорты с утолщением. Диаметр утолщения составил приблизительно 36 мм, а диаметр остальной части в среднем составляет 25 мм.

Для нисходящей аорты (DescAo, DAo) среднее значение диаметра аорты в норме составляет 23.5 мм со стандартным отклонением 4.37 мм [10]. Наличие расширения аорты с диаметром более 30 мм является признаком аневризмы аорты, а значение диаметр более 50 мм требует немедленного оперативного вмешательства.

Таким образом, распознавание 3D изображения позволяет подтвердить диагноз аневризмы (AAA) у пациента по набору изображений, т.к. диаметр аорты более 30 мм.

Полученные результаты сопоставимы по точности и производительности с другими известными из публикаций данными: DSC 0.873, время обработки 4 минуты [11], DSC 0.958, время обработки 21 минута [12].

Разработанные программы являются кроссплатформенными и могут использоваться в ОС Windows и Linux. На рис. 5 представлен пример визуализации метаданных из файла DICOM и реконструированное 3D изображение в ОС Ubuntu.

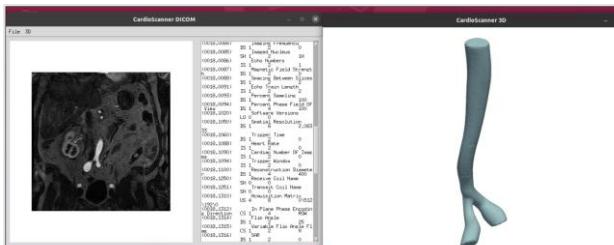


Рис. 5. Визуализация распознанного 3D изображения в среде ОС Ubuntu

VI. Выводы

В докладе представлены результаты распознавания изображений сегментов аорты в изображениях срезов, получаемых с помощью снимков КТ/МРТ.

Разработаны специальные методы автоматической классификации с применением алгоритмов машинного обучения, инструментальные средства и библиотека программ «Кардиосканер», которые существенно сокращают временные затраты ручной разметки и способствуют улучшению показателей точности и интерпретируемости принятых решений относительно нормы и патологий в изображениях.

Полученные результаты подтверждают точность и производительность автоматической сегментации на основе моделей машинного обучения и сопоставимы с известными из публикаций данными мирового уровня.

В дальнейшем планируется продолжить исследования моделей, алгоритмов и программ для автоматической диагностики патологий сердечно-сосудистой системы по результатам КТ/МРТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Spinella G. et al. Artificial intelligence application to screen abdominal aortic aneurysm using computed tomography angiography // Journal of Digital Imaging. – 2023. – Vol. 36, No. 5. – P. 2125-2137.
2. Jin Y., Pepe A., Li J., Gsaxner C., et al. AI-based aortic vessel tree segmentation for cardiovascular diseases treatment: status quo // arXiv preprint arXiv:2108.02998. 2021.
3. Radl L. et al. AVT: Multicenter aortic vessel tree CTA dataset collection with ground truth segmentation masks // Data in brief. – 2022. – Vol. 40. – P. 107801
4. Huang L., Lu J., Xiao Y., et al. Deep learning techniques for imaging diagnosis and treatment of aortic aneurysm // Frontiers in Cardiovascular Medicine. – 2024. – Vol. 11. – P. 1354517.
5. Vagenas T.P., Georgas K., Matsopoulos G.K. Deep Learning-Based Segmentation and Mesh Reconstruction of the Aortic Vessel Tree from CTA Images. MICCAI Challenge on Segmentation of the Aorta. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 80-94.
6. Byeon Y., Kim H., Kim K., Park D., Choi E., Hwang D. M3F: Multi-Field-of-View Feature Fusion Network for Aortic Vessel Tree Segmentation in CT Angiography. MICCAI Challenge on Segmentation of the Aorta. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 1-12.
7. Ghafari A.A., Nabil M., El-Kady H., et al. A Data-Centric Approach for Segmenting the Aortic Vessel Tree: A Solution to SEG-A. Challenge 2023 Segmentation Task. MICCAI Challenge on Segmentation of the Aorta. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 19-41.
8. Cereser L. et al. Development of a machine-learning-based CT educational tool for grouping pulmonary hypertension: A proof-of-concept study // 30th Annual Scientific Meeting of the European Society of Thoracic Imaging 2024
9. Котова Е.Е., Писарев И.А. Метод визуализации терминологических словарей и онтологий // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах (Эрго-2018): Труды Третьей международной научно-практической конференции / под редакцией А.Н. Анохина, А.А. Обознова, П.И. Падерно, С.Ф. Сергеева. – 2018. – С. 240-248.
10. Berhane H., Scott M., Elbaz M., et al. Fully automated 3D aortic segmentation of 4D flow MRI for hemodynamic analysis using deep learning // Magnetic resonance in medicine. – 2020. – Vol. 84, No. 4. – P. 2204-2218.
11. Hahn L.D., Mistelbauer G., Higashigaito K., et al. CT-based true-and false-lumen segmentation in type B aortic dissection using machine learning // Radiology: Cardiothoracic Imaging. – 2020. – Vol. 2, No. 3. – P. e190179.
12. Yu Y., Gao Y., Wei J., et al. A three-dimensional deep convolutional neural network for automatic segmentation and diameter measurement of type B aortic dissection // Korean journal of radiology. – 2021. – Vol. 22, No. 2. – P. 168.

Когнитивный аспект самоорганизации личности в спортивном экстриме

Бершова Анастасия Сергеевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
nasty.bersh17@gmail.com

Аннотация. Цель работы – рассмотреть когнитивный аспект самоорганизации личности в процессе преодоления ею спортивного экстрима в плане поиска эффективных методов развития познавательных способностей человека и их применения в экстремальных ситуациях. Показано, что экстремальные виды спорта могут быть использованы для интегрального развития личности, а главное, для развития её возможностей в самоорганизации, что жизненно важно в условиях роста активности внешних регуляторов.

Abstract. The purpose of the work is to consider the cognitive aspect of personality self-organization in the process of overcoming sports extreme in terms of finding effective methods for the development of human cognitive abilities and their application in extreme situations. It is shown that extreme sports can be used for the integral development of the individual, and most importantly, for the development of its capabilities in self-organization, which is vital in the face of growing activity of external regulators.

Ключевые слова: человек, личность, развитие самоуправление, самоорганизация, спортивный экстрим.

Key words: person, personality, self-government development, self-organization, extreme sports.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный спорт и, в частности, экстремальные его виды требуют от человека и его личности усилий не только в пределах своих возможностей – физических, психических и духовных, – но и часто возникающей необходимости выхода за эти пределы. Чтобы выдержать испытание экстримом, важно адекватное цели функционирования не только организма спортсмена, но и всех других структурных уровней его организации, поскольку экстремальный спорт – это тот вид деятельности, который снижает осознаваемую вероятность биологического выживания до состояния 0,5 и ниже. Это и опасность для жизни и здоровья, и возможность повышенного травматизма, что, для преодоления, несомненно требует не только хорошей физической подготовки, но и одновременно столь же хорошей стратегической (духовной) и тактической (психологической) подготовки спортсмена.

Экстремальный спорт является одним из расширителей границ человеческих возможностей и потенций, а сопровождающая его опасность для жизни – необходимый фактор этого процесса. Как показывает практика,

главным критерием для отбора в спортсмены экстремальных видов спорта есть предельная степень готовности к резко изменяющимся условиям внешней и внутренней среды и умение быстро, адекватно ситуации и цели ориентироваться в оценке своих возможностей.

Например, занятия фрирайдингом требуют от занимающегося человека тотальной включённости всех его структурных, а главное, когнитивных составляющих, не столько в привычном режиме их функционирования, сколько в режиме активизации потенциального ресурсного обеспечения их функционирования в процессе погружения, выполнения упражнения и всплытия. Без этого достижение целевого результата проблематично, как и обеспечение при этом достаточной вероятности биологического выживания спортсмена, поскольку возможен, например, пропуск фиксации экстремальной ситуации в виде осознанно неуправляемого внетсяесного опыта [1], с которым спортсмен должен быть знаком и теоретически, и практически, дабы не покинуть своё тело, лежащим на глубине без системы управления, без своего сознания.

В приведенном примере, именно биологическое выживание личности спортсмена в процессе преодоления экстрема неизбежно является общей, объединяющей целью для всех структурных элементов иерархической системы «человек», являя собой особое состояние целостного когнитивного восприятия мира и ситуации, без которого принятие решений, адекватных цели невозможно. Это состояние является квинтэссенцией слаженной работы всех когнитивных структур системы «человек», имеет интегральный характер и не может быть достигнуто только дифференцированными практиками, которые тренируют и совершенствуют отдельные механизмы жизнеобеспечения спортсмена. Необходимо именно интегральное взаимодействие всех структурных составляющих человека, и наиболее гармоничным путём достижения этой цели является совершенствование человеком своих возможностей самоуправления – самоорганизации, самоконтроля и саморегуляции.

И здесь, прежде всего возникает проблема самоорганизации второго рода, в процессе которой в уже организованной системе необходима способность её субъекта, порой мгновенно, изменять систему внутриструктурных отношений для успешного вхождения в экстремальную

ситуацию и безопасного выхода из неё. В свою очередь, эта проблема порождает, в качестве первостепенной задачи, развитие когнитивного аспекта самоорганизации, поскольку без самоконтроля параметров экстремальной ситуации и её характера, в целом, задача саморегуляции и самоорганизации не решается, что и является сущностью феномена тринитарных структур – тотальной взаимосвязи их составляющих [2].

Парадигмальный анализ возможных решений

Решение обозначенной проблемы не может быть найдено в системе классической науки, поскольку в её парадигме когнитивистика сводится к изучению, анализу и совершенствованию только сенсорных систем человека, обладающих чрезвычайно узкой полосой восприятия внешних сигналов. Это связано с тем, что в её представлениях и в мировоззрении, в целом, человек отождествляется только с его биологическим телом, феноменология сознания рассматривается с точки зрения функций мозга, человек не имеет предшествующего опыта, личностью не рождаются, а становятся и т.п. И, кроме всего прочего, в классической науке нет такого понятия как «самоорганизация» и нет синергетики как науки о самоорганизации, самоконтроле и саморегуляции, как науки о синергии – появления в системе нового качества, не присущего её отдельно взятым элементам, при объединении этих элементов в систему согласно принципу единства цели.

Достижение наукой пост-неклассической стадии развития ознаменовалось, своего рода, революцией в науке [3] и фундаментальной сменой научной картины мира, в которой появилась, кроме вещества и энергии как субстанций, и субстанция информации. Возникла даже новая отрасль науки «Эниология» – наука об энергоинформационных обменах в природе и в человеке, [4, 5] и соответствующая «Международная академия энергоинформационных наук», одним из организаторов которой стал генерал Фиряз Рахимович Ханцеворов, написавший серию книг, посвящённых этой проблеме. К этому процессу подключились и генералы Ратников Б.К. и Рогозин Г.Г., опубликовавшие книгу «Картина мира в представлении спецслужб: от мистики до осмыслиения» [6]. И это всё закономерно, поскольку спецслужбы постоянно работали и работают в экстриме, откуда и необходимость использования знаний, накопленных веками, которые в наше интересное время стало доступно всем интересующимся и спортсменам в том числе.

Из числа гражданских лиц неоценимый вклад в развитие когнитивистики и процессов самоуправления внес американский философ и мастер трансперсональной психологии К. Уилбер, который подарил миру методологию интегрального видения исследуемого четырьмя «очами познания»: оком тела, оком ума, оком души и оком духа [7], которые в совокупности и образуют модель обобщённой когнитивной структуры человека, показанную на рис. 1 и соответствующую парадигме и мировоззрению пост-неклассической науки, подробно раскрытым в работе [8].

Око ума – восприятие смысла в понятийных и знаковых системах



Око души – чувственное и сверхчувственное восприятие

Око тела – сенсорное восприятие, ощущения

Око духа – интуитивное восприятие

Рис. 1. Модель когнитивной структуры человека

В этой структуре «око тела», обеспечивающее объективное восприятие мира и его объектов средствами сенсорных систем человека, достаточно хорошо исследовано и в классической науке, но ошибочно названо в ней совокупностью органов чувств, хотя чувствование уже относиться к функциям «ока души», а око тела обеспечивает не чувства, а ощущения [8].

«Око ума», в смысле «физического разума», как фрагментатора мира [9], в классике определяется как функция мозга, что не соответствует действительности, поскольку тело не может быть субстратом (производителем) сознания и психики человека. Это причина того, что даже в прогрессивных исследованиях око ума и око тела может быть объединено структурно и называться оком тела. Это неизбежное наложение классической тени на мировоззрение более высоких стадий развития науки, которое необходимо учитывать при парадигмальном анализе путей и возможностей решения поставленной проблемы.

В своем взаимодействии «око ума» и «око тела» обеспечивают объективный и осознаваемый личностью способ познания. Но, в преодолении экстремальных ситуаций любого плана (спортивного или жизненного) ограничиться объективным способом познания невозможно, поскольку объективное представляет собой мир реальности (вещности), тогда как экстремальная ситуация зарождается и разворачивается в пространстве действительности, информационный объем которой стремится к бесконечности и не может быть обработан на уровне периферийного сознания личности, на уровне осознаваемого, обладающего способностью обрабатывать одновременно только от трёх до девяти образов действительности. Поэтому и необходимо интегральное видение всеми четырьмя очами познания.

Око души обеспечивает чувствование – «видение» энергетической картины мира, что промоделировано во всех технических средствах связи. Чувствование, как один из компонентов когнитивной подготовки, это уникальный психический процесс, осуществляющий взаимосвязь внешнего мира и внутреннего мира человека, и взаимный переход внешних поведенческих паттернов во внутренние психологические качества. К.А. Абульханова-Славская в своей книге «Стратегия жизни» [10] указывает, что чувствование обеспечивает «единое душевное пространство» без границ внешних (с человеческим культурным социальным миром) и внутренним (с внутренним миром человека), и является одной из составляющих экзистенциального пласта психики, как сложное этико-эмоциональное образование. В основе этого образования лежит с одной стороны явление «отраженной субъектности», отражение «других» как активных субъектов, что отмечает В.А. Петровский [11], с другой стороны, конструирование внутри собственной личности «системы ожидаемых отношений «других» к «себе».

Причём, эта система ожиданий может воспроизводить внутри себя внутреннее своеобразие «других» до такой степени, что ожидаемые мысли и чувства этих «Я» совпадут с мыслями и чувствами реальных других. Эта способность создавать «пространство единения» для «себя и другого» зависит от дивергентной или конвергентной направленности его чувствования. Дивергентное направлено на расширение границ личности, за счёт включения «других» в свою Я-концепцию, а конвергентное – за счёт концентрации личности на позиции «Я», возможно, что и через противопоставление её «другим». Отмечается [12], что дивергентное мышление – качество творческой личности.

Все эти фактофиксации классиков по поводу чувствования отображают объективный аспект наблюдаемого. Для того, чтобы понять истинную сущность феномена чувствования необходимо детальное изучение теории поля в радиотехнике и феномена нелокальности квантовых эффектов в физике, которые и наблюдаются не только в процессе работы ока души, но и ока духа.

Око духа – один из аспектов человеческого сознания, не связанных с телесной формой человека, но позволяющий, благодаря обратимости зрительного анализатора, визуализировать получаемую информацию, путём её трансляции из области сознания, (Триединого Духа) как иерархически высшей системы самоуправления в человеке, на нижние уровни структурной организации человека, проходя которые, эти сигналы усиливаются и преобразуются в более доступные для восприятия каждым следующим уровнем. И так этот процесс и происходит, как это следует из семиуровневой модели человека М. Генделя [13]. И именно эта модель человека использована в естествознании при разработке радиоприёмных устройств, на вход которых попадает утончённый радиосигнал, а пройдя несколько ступеней усиления и преобразования, информация, наложенная на этот радиосигнал, позволяет управлять пикселями экрана и акустическими системами [8].

Так в человеке: утончённый сигнал Божественного Духа передается Жизненному Духу, им усиливается, преобразуется и передаётся на ступень ниже – Духу человеческому, который непосредственно управляет телом мысли человека. Тело мысли передаёт полученный сигнал телу желаний, а оно передает «ниже» – жизненному (эфирному) телу человека, которое непосредственно управляет мозгом человека, заставляя его возбудить «пиксели» сетчатки глаза, что и приводит к эффекту «ви-зионерской логики», позволяющему видеть образы будущих и прошлых событий. А это, в свою очередь, и делает осознанное управление оком духа важнейшим когнитивным фактором самоорганизации человека в экстремальных ситуациях [8, 13].

Для иллюстрации сказанного можно привести модель человеческого сознания, разработанную в раннем буддизме (рис. 2) [8, 14], в которой «Триединый Дух» в модели М. Генделя ассоциируется с тринитарной структурой сознания: Божественный Дух – сублиминальная зона человеческого сознания; Жизненный Дух – субпериферийная, сновидческая зона сознания; Человеческий Дух – периферийное сознание бодрствующего человека – то, что осознаётся.

Периферическая зона
(сознание бодрствующего,
мир яви у древних ариев)
Субпериферическая зона
(сознание спящего,
мир нави – сновидений)
Сублиминальная зона
(Мир Прави – Мир Богов)

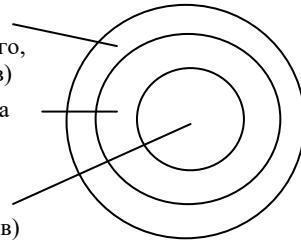


Рис. 2. Модель структуры человеческого сознания

В этой структуре периферическое сознание функционально направлено на обеспечение объективно регистрируемой деятельности, сновидческое сознание позволяет работать с коллективным сознанием жизненного мира человека, при условии освоения техники осознаваемых сновидений, а сублиминальная зона это выход на осознанную информационную связь со всей вселенной, что возможно только при полном отключении телесной формы, но держа её состояние под контролем, дабы сохранить её жизнеспособность. Для осознанного входа в эту зону используются техники буддийской нирваны, техники внегородского опыта [1] и осознанное проживание околосмертного опыта [15].

Рассмотренные модели человека, его когнитивной структуры и тринитарной структуры его сознания позволяют сделать важные промежуточные выводы.

Суть когнитивного аспекта самоорганизации второго рода, неизбежно проживаемой при вхождении в экстремальную ситуацию и в процессе её преодоления, заключается в иерархической перестройке внутри когнитивной структуры восприятия, поскольку без достаточного информационного обеспечения любой деятельности трудно надеяться на её успешность и на достижение поставленной цели. При этом естественным выводом является признание, в случае необходимости самоорганизации, первого приоритета за оком духа, поскольку его информационные потоки превышают по количественным и качественным характеристикам информационные обмены не только объективно ориентированных когнитивных структур человека (ока тела и ока ума), но и ока души, «видящего» энергетическое состояние жизненного мира. Последнее, естественно тоже очень важно, поскольку энергия, например электромагнитного поля, практически всегда служит «площадкой», на которой перемещается информация. Поэтому «око души» в экстремальных ситуациях имеет второй приоритет. На реализацию этих приоритетов в самоорганизации должна быть направлена подготовка спортсменов в экстремальных видах спорта.

II. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПРАКТИКИ ОСВОЕНИЯ ОСОЗНАВАЕМОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ В ЭКСТРИМЕ

Интегральная практика – это эффективная тренировочная система всестороннего развития и самораскрытия человека, которая, вследствие возникновения синергетического эффекта, раскрывает и развивает потенциальные возможности человека, его непроявленный личностный ресурс и содержит в себе намного более эффективные и мощные методы самоуправления по сравнению с практиками дифференциальными.

«Интегральная практика» – как понятие уходит своими корнями к древним системам подготовки воинов, тибетским мастерам, и другим восточным системам воспитания что было хорошо разъяснено при разработке мето-

дологии «интегральной жизни» Интегральным институтом К. Уилбера [16], а также другими организациями (институтом Эсален в США [17], школами трансперсональной психологии и др.), исследующими предельные возможности человека и пути их достижения.

Автором фундаментальных работ, разъясняющих смысл понятий «интегральной жизни», «интегральных практик» и «интегрального видения» (постнеклассической методологией познания) К. Уилбером введена четырёхсекторная модель пространства и системы жизненного мира человека, включающая его картину мира, которую можно анализировать при осознанной работе с этой четырёхсекторной моделью. Согласно этой модели, человек одновременно пребывает в четырёх пространствах бытия: индивидуальном, коллективном, объективном и субъективном, что является смыслом понятия «интегральной жизни», как способа осознанного существования и совершенствования себя во всех четырёх пространствах. Мир представляет собой сочетание множества форм (объективное Я), каждая из которых имеет своё содержание (субъективное Я). Все эти формы образуют бесконечное количество систем (иерархий) «объективное Мы», которые формируются по принципу включённости: клетка тела входит в ткань, ткань в орган и т.д. Между тем, клетка состоит из молекул, молекулы из атомов, атомы из элементарных частиц... Иерархии форм в качестве своего содержания имеют и иерархии сознания (субъективное Мы), которое в свою очередь входят в «коллективное», что хорошо описано швейцарским психологом К. Юнгом и его учениками. Феномен существования коллективных явлений в психике большого числа людей всегда привлекал внимание исследователей. Так, последователи Дюркгейма направили своё внимание на изучение «коллективных представлений», современные социальные науки изучают массовые спонтанные реакции людей на критические (пограничные) ситуации, основными характеристиками которых являются их непредсказуемость, непривычность и новизна.

Интегральные практики осознанности строятся таким образом, что практикующий интегральную жизнь одновременно работает над совершенствованием своих действий во всех четырёх пространствах, развивая свои составляющие этих пространств, например биологическое тело, свою адекватно выстроенную мотивацию, нравственный закон по отношению к себе и другим и своё поведение. Пространство «субъективного Я» и «субъективное Мы» предельно динамичны, и требуют интегральной оценки этого процесса, потому как объективными измерительными инструментами можно успешно измерять статичное и ощущаемое, а «субъективное» находится в сознании человека, что представляет собой определённые трудности для его осознанного объективного исследования и управления. На преодоление этих трудностей и нацелены интегральные практики, в начале которых человек должен научиться анализировать себя как субъекта (управителя) деятельности.

Готовность человека стать субъектом деятельности имеет в качестве препятствия неадекватную мотивацию и низкий стартовый уровень субъектности, как способности личности самой управлять своим жизненным путём. Как разъяснял Я.И. Колтунов, эта деструкция личности вследствие принятия ею негативных решений может быть приостановлена пробуждением самосознания с вос-

становлением возможностей личности, её дальнейшего гармоничного самосовершенствования, построения ею позитивной событийности своей жизни. Предлагаемые им методы способствуют росту навыков психоэнергетической саморегуляции физических, физиологических, информационных, интеллектуальных, биopsихических и других способностей человека. В основу его методов положены «мыслеобразы» и их взаимодействие в «субъективном Я» и «субъективном Мы» [18].

Внутреннюю работу со своим сознанием также положил в основу своего метода антистресса Хасай Алиев. Его метод был разработан для адаптации космонавтов к экстремальным условиям деятельности, для преодоления стресса и перегрузок. Метод также ориентирован на достижение психофизиологического состояния, которое возникает «в ритме деятельности», в движении и порождает «пустоту» (безмыслие) в сознании, позволяет пронести «автоматическую перезагрузку» мозга. Приемы этого метода базируются на синхронизации деятельности обоих полушарий с помощью управляемых рефлексов по методике «синхрогимнастика» [19].

М.С. Норбеков – основатель «Института самовосстановления человека» – и Ю.Е. Хван – основатель федерации Сам-Чон-До – рассматривают экстремальную ситуацию как экспансию внешних сил, которой нужно уметь адекватно противостоять. Это стиль жизни, нацеленный на духовное самосовершенствование, и позволяющий преодолевать препятствия в экономном режиме [20].

И.А. Воронов, изучавший подготовку восточных единоборцев, снимает завесу таинственности над восточными, «мистическими» методами обучения и психологоческой подготовки, указывая на важность законов психофизиологии и хронобиологии человека, расширяя её с помощью методов суггестивного воздействия и самовоздействия. Уделяя особое внимание резервам психики, он считает, что развитие когнитивных способностей является точкой роста спортивных достижений и сокращения сроков подготовки [21].

Многие авторы связывают активацию резервных возможностей человека с особыми состояниями сознания. На практике, эти способности часто появляются под воздействием стресса, или демонстрируются мастерами транса – йогами, восточными единоборцами, спортсменами экстремального спорта. Создаётся впечатление, что в этих особых состояниях сознания, человек создаёт вокруг себя «виртуальную» (в восприятии другими) реальность, где меняются даже законы природы (уменьшается тяготение, возрастает сопротивление кожи и мышц). И для него это так и есть. Такая же изменённая реальность может возникать в состоянии стресса, когда все силы брошены на активизацию. Способность к самоуправлению в процессе творящего её в себе человека способна порождать изменения в его жизненном мире.

Все интегральные практики подготовки, в итоге, направлены на расширение периферийного сознания (осознаваемого), их объединяет интегральная система когнитивной подготовки, которая включает целостное развитие личности, её самоуправления и познавательных способностей, возможности быстро входить в состояние «пустотности» сознания (безмыслия), и входить в надсituативное состояние – состояние «свидетеля» происходящего. Это – метасистемный подход к решению задачи самоорганизации в экстриме.

При самооценке уровня когнитивной подготовки характерно умение рефлексировать в себе такие проявления, как изменение мышления (полное отсутствие мыслей, мысли заменяют образы и т.д.), фиксировать иска-жения времени (субъективное замедление или ускорение), осознанная работа с активным воображением, умение изменять своё состояние применением ритмической последовательности слов и звуков (пускание «информационной волны» в себе), работа со своим мышлением посредством осознанного целеполагания. Касательно последнего, качество мышления зависит от того, с какой концепцией развития человека отождествляет себя личность. Картина мира личности формируется из её убеждений, ценностей, установок, что усложняет восприятие реальности, формируя предвзятое её рассмотрение через фильтр определённых ожиданий личности, а для адекватного прохождения экстремальной ситуации этого фильтра быть не должно, человек должен быть готов к любому развороту событий в состоянии «пустотности» сознания (особого состояния сознания), т.е. уметь контролировать собственную адаптивность в пользу надси-туативного поведения. То есть, для качественного развития когнитивных способностей своей личности спортсмену необходимо идти путём развития, прежде всего, осознанности и интегрального видения.

Работа личности со своим внутренним пространством и внутренним временем качественно меняет ее потенциал в сторону улучшения самоуправления, в целом, и каждой из его составляющих – самоорганизации, самоконтроля и саморегуляции.

III. ПРОБЛЕМА ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ГОТОВНОСТИ К ЭКСТРИМУ

Как уже отмечалось, непосредственная точная оценка состояния субъективного пространства личности объективными средствами невозможна. Но, существует возможность анализа субъективного пространства человека с помощью изучения его отражений и отображений в пространствах «объективного Я» и «объективного Мы», например с помощью технических средств фикса-ции и измерения. Одним из таких технических средств является аппаратура обеспечения метода газоразрядной визуализации, основанного на эффекте визуализации «жизненного» (эфирного) тела человека в поле токов высокой частоты [21].

Этот метод позволяет достаточно оперативно определить влияние на человека тех или иных факторов и воздействий. С его помощью исследуются как видовые границы способностей человека, так и выход за их пределы, и возможность наблюдения происходящих в человеке процессов в их динамике.

Конкретная методика включает в себя: газоразрядную визуализацию эфирной субстанции пальцев человека в поле токов высокой частоты, её фиксацию с помо-щью специализированной фотокамеры и последующую цифровую обработку до вида двумерных графических изображений и их числовых данных.

Двумерное графическое изображение свечения воз-буждённого эфирного тела называют ГРВ-граммой, кото-рая является, своего рода, отображением целостного био-логического поля человека, возникающего в совместной работе клеток, органов и систем на всех уровнях биологической организации человеческого тела, позволяя, та-

ким образом, косвенно изучать и психические процессы и состояния сознания. Возникает возможность качественно и количественно изучать, а значит, и корректировать субъективный аспект человека, что подтверждено в про-цессе экспериментальных исследований.

IV. Выводы

Задачей осознаваемых интегральных практик является доведение процессов ресурсной интеграции всех сис-тем личности до автоматизма. Чтобы развить в спортив-ном экстреме интегральные качества личности, такие как способность к самоорганизации, самоконтролю и само-регуляции, необходимы специальные средства инте-грального характера, направленные не на развития конкретного качества, а на самоорганизацию системы «человек» в плане повышения его системных, целостных возможностей.

Самоконтроль, как уникальный феномен, присущий человеку и его личности, таит в себе определённые воз-можности мобилизации дополнительных психологичес-ких резервов и энергетических потенциалов за счёт осознанной саморегуляции. Можно сказать, что самокон-троль является сутью регуляции самой личностью своего состояния, поведения и деятельности, поскольку он обес-печивает «обратную связь», без которой не видны резуль-таты деятельности и содержание очередных действий.

Особый класс объектов в самоконтроле человека – пси-хические состояния, а более широко – это внутренний мир личности. В свою очередь, в самоконтроль входит широкий круг явлений, связанных с благоприятным и неблагоприят-ным фоном, при которых человек вынужден контролиро-вать эти состояния в рамках требований и критериев той или иной деятельности и поведения в целом. В акты само-контроля включены волевые усилия в широком диапазоне регуляции человеческой активности. В структурном отно-шении самоконтроль можно рассматривать с трёх сторон, как с познавательной (самопознание, самоконтроль), так и с эмоционально-ценностной (самоотношение), и с действен-но-волевой, регулятивной (саморегуляция, самоорганиза-ция). Как указывал Д. Келли, человек в своём движении по миру выступает как учёный, исследователь. Познавая мир, он конструирует его в своей психике, т.е. понять внешний мир можно лишь воссоздав его в себе [23].

В экстремальной ситуации происходит трансформа-ция смысловой структуры личности, и при адекватном и осознанном отношении к ней, осуществляется смысловая трансгрессия, открываются новые горизонты реализации бытийных смыслов, открывается смысловая перспектива развития и роста личности. При неадекватном прожива-нии экстрема человек может переживать смысловые конфликты, смысловые кризисы, утрату смысла и неус-пешность в экстремальной деятельности. В экстремаль-ной ситуации человеческое существование открывается также и в этико-эстетическом измерении – в этой сфере смыслы личности творятся не только в инстанции истины, но и открываются в сфере добра и зла, красоты и безобразия, ответственности и безответственности, а смысл «почему» и «ради чего» трансформируется в «смысл для» – для бытия в жизни и времени. Поэтому когнитивный аспект самоорганизации личности включа-ет самоисследование и осознанную работу с внутренним пространством, внутренним временем, внутреннем диа-логом на фоне интрапсихических основ социального взаимодействия – доминирования или подчинения, аль-truизма или эгоизма.

Саморегуляция, при осознанности целей деятельности и процесса её протекания, также опирается на смысловые образования, как и любое другое действие личности. В процессе развития личности мотивы опосредуются сознанием через сознательно поставленные цели. Смысловая регуляция деятельности взаимосвязана с отношением ко времени, а волевое действие характеризуется пространственно-временной свободой и намеренной сознательной активностью. Плановость и упорядоченность деятельности во времени также базируется на смысловых структурах развитой личности, как указывал Д.Н. Узгадзе. Временной раздражитель есть в формировании любого динамического стереотипа и является основой механизма сложных координационных действий в спорте. С помощью исследования реакций динамического стереотипа на временной раздражитель проявляются особенности структурно-неосознаваемых процессов, которые определяют поведенческие реакции личности. Эти данные используются для коррекционной работы с личностью.

Способность к осознанной саморегуляции является важным мотиватором достижения высоких результатов в спорте – она может активировать или притормаживать протекание психических процессов, воздействовать на мотивацию, это улучшает качество выполняемой деятельности, что необходимо для эффективного и быстрого анализа информации в экстремальной ситуации и в экстремальных условиях. Ведущих спортсменов мира можно отнести к числу самых приспособленных людей на планете, приспособленных, как физически, так и ментально [24]. Чтобы противостоять высокому уровню конкуренции и выполнять работу на пределе возможностей нужна хорошо развитая способность к самоуправлению, которая является основой психической настойчивости, высокой психической работоспособности, помехоустойчивости, эмоциональной стабильности и, в итоге, безопасности.

На примере фридайвинга, хорошо видно, что именно работа иерархически высших структур сознания обеспечивает контроль деятельности и решение задач обеспечения жизненных функций организма. Н.В. Молчанова указывала, что главной задачей тренировки фридайвера есть «повышение устойчивости к гипоксии прежде всего головного мозга за счёт реорганизации всех систем жизнеобеспечивания посредством мобилизации ряда ранее неактивных генов» и поэтому так важна работа с сознанием и мышлением [25]. Именно тотальная включённость всех структурных составляющих в режиме активации потенциального ресурсного обеспечения и их совместного функционирования приводит к достижению целевого результата и обеспечению безопасности путём качественного процесса самоорганизации личности.

Ключевые характеристики личности, необходимые для обеспечения безопасности её развития вытекают из тринитарной модели «тело-душа-дух»: здоровое тело (системная устойчивость телесной формы человека и её гомеостаза в динамически изменяющихся условиях экстрема), здоровая душа (эмоциональная устойчивость личности, не зависящая от изменений жизненного контекста) и здоровый дух, сохраняющий ситуативную независимую высокую нравственность человека и его личности в динамически изменяющемся мире. Это иерархически высшая тринитарная структура ключевых характеристик личности экстремала [8].

Литература

1. *Монро Роберт*. Путешествия вне тела: пер. с англ. – Киев: София, 2001. – М.: Изд. дом «Гелиос», 2001. – 320 с
2. *Захаревич В.Г., Непомнящий А.В.* Самоконтроль, саморегуляция и самоорганизация в учебном процессе: учебное пособие по курсу «Инженерная психология». – Таганрог: ТРТИ, 1989. – 85 с.
3. *Kuhn T.S.* The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press Ltd, 2nd ed. Chicago, London, 1970.
4. *Ханцеворов Ф.Р.* Эниология: непознанные явления биолокации, телекинеза, уфологии, ясновидения, телепатии, астрологии. Кн. 1. От интуитивных догадок – к современной науке / Международная академия энергоинформационных наук. АНМ, Москва, 1996. – 282 с.
5. *Ханцеворов Ф.Р.* Эниология: чудеса без мистики. Книга научных версий. / Международная академия энергоинформационных наук. АНМ, Москва, 1999. – 445 с.
6. *Ратников Б.К., Рогозин Г.Г.* Картина мира в представлении спецслужб. От мистики до осмыслиения. – Изд-во «Белые альвы», 2023. – ISBN 978-5-91464-387-1.
7. *Уилбер К.* Очи познания: плоть, разум, созерцание: пер. с англ. Е. Пустошкина. – М.: РИПОЛ классик, 2016. – 464 с. – (интегральный мир).
8. *Непомнящий А.В.* Введение в интегральную антропологию: учебное пособие: в 3 ч. – 2-е изд. доп. и перераб. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ. Часть 1: Методология знания и методологические основания человековедения. – 2021. – 312 с. – <https://hub.sfedu.ru/repository/material/801298485/> 25.06.2024ю
9. *Шри Ауробиндо.* Собрание сочинений. Т. 1. Биография. Глоссарий: пер. с англ. – СПб.: Адити, 1998. – 571 с.
10. *Абульханова-Славская К.А.* Стратегия жизни. – М.: Мысль, 1991. – 299 с.
11. *Петровский В.А.* Личность в психологии: парадигма субъектности. – Ростов-на-Дону: Феникс, 1996. – 512 с.
12. *Дружинин В.Н.* Психология общих способностей: учебное пособие для вузов. – 3-е изд. – М.: Изд-во «Юрайт», 2024. – 349 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-09237-0.
13. *Гендель М.* Космоконцепция розенкрайцеров или мистическое христианство. – М.: Литан. 2004. – 560 с.
14. *Лама Анагарика Говинда.* Психология раннего буддизма. – СПб.: Изд-во «Андреев и сыновья», 1993. – С. 1-129.
15. *Ефремов В.* Откровения физика, пережившего клиническую смерть. – <https://ljudov-i-svet.livejournal.com/1456494.html> 25.06.24.
16. *Уилбер К., Паттен Т., Леонард А., Морелли М.* Практика интегральной жизни. Модель физического здоровья, эмоционального баланса, умственной ясности и духовного пробуждения для двадцати первого века. Электронное издание Integral Books, Boston&London. – 2008. – <https://www.litres.ru/book/adam-leonard/praktika-integralnoy-zhizni-9236903/chitat-onlayn/> 24.03.2024.
17. *Будущее тела: исследование дальнейшей эволюции человека /* Майкл Мерфи: пер. с англ. М. Ошуркова и др. – М.: РИПОЛ классик: Открытый мир, 2010. – 908, [2] с.; 24 см. – Вариант загл.: Исследование дальнейшей эволюции человека. – Библиогр.: С. 830-906. – Пер. изд.: The future of the body. Explorations into the further evolution of human nature / Michael Murphy.
18. *Колтунов Я.И.* Космическое самопрограммирование. – М.: 1993. – Электронный ресурс: <http://www.koltunov.ru> (дата доступа: 13.02.2024)
19. *Алиев Х.М. Ключ.* 2003. – Электронный ресурс: http://royallib.com/read/aliev_hasay_klyuch.html#0 22.06.2024.
20. *Норбеков М.С., Хван Ю.Е.* Тренировка тела и духа. – СПб.: Питер, 2002. – 160 с.
21. *Воронов И.А.* Психотехника восточных единоборств. – Харвест, 2006. – 432 с.
22. *Коротков К.Г.* Основы ГРВ биоэлектрографии. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001. – 360 с.
23. *Хьюлл Д., Зиглер Д.* Теории личности. – СПб.: 1997.
24. *Moor Paul.* Ultra Performance: The Psychology of Endurance Sports. – Bloomsbury USA, 2014. – 176 p.
25. *Молчанова Н.В.* Методика тренировки фридайверов: уч. метод. пособие. Федерация фридайвинга россии. – М., 2008.

Секция VI

БЕСПИЛОТНЫЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
СИСТЕМЫ

DOI: 10.18522/syssyn-2024-58

Синергетический синтез законов адаптивного
управления самолетом-амфибией при заборе воды
на режиме глиссирования

Попов Иван Андреевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
i.popov@sfedu.ru

Аннотация. Доклад посвящен разработке адаптивной системы управления самолетом-амфибией на режиме глиссирования с построением асимптотического наблюдателя состояния. Обоснована необходимость проведения процедуры синтеза асимптотического наблюдателя внешних возмущений. На основе принципа расширения фазового пространства получена математическая модель самолета-амфибии на режиме глиссирования с учетом внешних возмущений. Проведена процедура синергетического синтеза регулятора с построением подсистемы асимптотического наблюдателя. Представлены результаты компьютерного моделирования полученной замкнутой системы управления.

Annotation. The report is devoted to the development of an adaptive control system for an amphibious aircraft in the planing mode with the construction of an asymptotic state observer. The necessity of carrying out the procedure of synthesis of an asymptotic observer of external disturbances is substantiated. Based on the principle of expansion of phase space, a mathematical model of an amphibious aircraft in planing mode is obtained taking into account external disturbances. The procedure of synergetic synthesis of the regulator with the construction of a subsystem of the asymptotic observer is carried out. The results of computer modeling of the obtained closed control system are presented.

Ключевые слова: самолет-амфибия, режим глиссирования, регулятор, синергетический синтез, метод АКАР, наблюдатель состояния.

Keywords: *amphibious aircraft, planing mode, regulator, synergetic synthesis, ADAR method, state observer.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Режим глиссирования является одним из самых сложных и неустойчивых режимов движения самолета-амфибии (СА). Это обусловлено как нестационарным изменением большого количества внутренних и внешних параметров, определяющих динамику СА, так и серьезной нагрузкой на летчика, который должен следить не только за динамическими параметрами, характеризующими правильное установившееся глиссирование, но и параметрами, определяющими влияние внешней среды на динамику СА. К подобным параметрам в первую очередь относятся внешние возмущения, представляющие собой суммарные ветро-волновые возмущения, оказывающие значительное влияние на параметры мореходности СА и на возможность его безопасной эксплуатации при движении на воде. От характера, степени и направления морского волнения зависят не только динамические параметры, описывающие правильное и устойчивое глиссирование СА, но и степень нагрузки на летчика. В условиях значительного морского волнения из-за внезапных волновых ударов, ведущих к просадкам по скорости и возникновению сильных колебаний по углу дифферента, реакции и квалификации летчика может не хватить для парирования внезапных продольных колебаний СА по углу дифферента точным отклонением руля высоты путем перебора ручки управления самолетом (РУС).

По этой причине для наиболее эффективной эксплуатации СА на режиме глиссирования при постоянно действующих внешних возмущениях необходимо проектировать новые классы систем автоматического управле-

ния (САУ) типа автопилот, которые будут не только управлять движением СА без вмешательства летчика, но и наделять его свойством адаптивности и инвариантности к постоянному влиянию внешних ветро-волновых возмущений. В данной работе был представлен метод синергетического синтеза адаптивной системы управления движением СА с построением асимптотического наблюдателя внешних возмущений.

II. ВЛИЯНИЕ ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ САМОЛЕТА-АМФИБИИ НА РЕЖИМЕ ГЛИССИРОВАНИЯ

Движение СА в условиях регулярного морского волнения имеет свои особенности, заключающиеся в резком изменении динамических параметров СА при столкновении со встречной волной. Очевидно, что степень изменения параметров движения СА зависит от величины гидродинамических характеристик, определяющих степень морского волнения. Но в любом случае, при столкновении со встречной волной происходит резкое увеличение угла дифферента с последующей просадкой скорости движения СА. Подобное столкновение с волной может стать причиной выхода СА за верхнюю границу устойчивости, что приведет к нарушению физики процесса установившегося глиссирования.

На стадии предварительного проектирования СА устанавливаются предельные значения гидрометеорологических условий (ГМУ), в рамках которых должен эксплуатироваться СА. Подобные ограничения описываются в Руководстве по летной эксплуатации [1], и нужны, прежде всего, для летчиков, которые оценивают состояние водной поверхности визуально (при отсутствии другой информации), и должны на основании этой субъективной оценки принимать решение о возможности эксплуатации СА при установленных параметрах морского волнения. Однако эта оценка носит приблизительный характер, в основном из-за сложности визуального определения характеристик морского волнения, поэтому из-за влияния человеческого фактора она не может являться точным основанием для принятия решения о возможности эксплуатации СА на воде.

По этой причине необходимо применять другие методы оценивания параметров внешних возмущений, что приводит к необходимости проектирования подобных оценивающих САУ, к которым относятся и адаптивные системы управления с асимптотическими наблюдателями внешних возмущений. Путем добавления в структуру системы управления дополнительной подсистемы наблюдателя, гармонично взаимодействующей с базовым синтезированным регулятором, можно не только оценить влияние внешних возмущений на динамические характеристики СА, но и наделить спроектированную САУ свойствами адаптивности и инвариантности из-за изменения этих внешних возмущений путем получения их косвенных оценок. При этом заданные инвариантные системы управления остаются такими же, как при базовой процедуре синергетического синтеза регулятора, что гарантирует спроектированной системе асимптотическую устойчивость относительно влияния внешних ветро-волновых возмущений.

III. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С АСИМПТОТИЧЕСКИМ НАБЛЮДАТЕЛЕМ

A. Метод синтеза асимптотических наблюдателей

Методы построения адаптивных систем управления с наблюдателями состояния давно используются в рамках современной теории управления [2, 3]. Подобные системы применяются для решения конкретных задач управления в тех ситуациях, когда полное измерение отдельных компонентов вектора состояния объекта отсутствует, либо неосуществимо. По этой причине строится подсистема, именуемая наблюдателем, которая может косвенно оценить значения неизмеряемых переменных состояния по величинам измеряемых. К подобным задачам относится и задача адаптивного управления в условиях внешних гармонических или кусочно-постоянных возмущений, реальные значения которых, как правило, нельзя измерить даже с учетом понимания физики возникающих возмущений. При этом построение наблюдателей состояния используется не только для получения оценок переменных состояния объекта и для измерения внешних возмущений, но также и для получения оценок неизмеряемых параметров математической модели.

В рамках синергетической теории управления также был разработан метод синтеза асимптотических наблюдателей, успешно применяемый для построения адаптивных нелинейных систем управления высоких порядков [4, 5]. И разработанный метод синтеза асимптотических наблюдателей состояния активно используется для решения различных прикладных задач управления путем построения адаптивных синергетических регуляторов [6–10].

Метод синтеза нелинейных систем управления с асимптотическими наблюдателями состояния основан на принципе расширения фазового пространства состояния синергетической теории управления [5, 6]. Поскольку такие неизмеряемые параметры, как внешние возмущения, как правило, отсутствуют в исходной математической модели объекта управления, то проектируемая система управления не будет знать о них, и, соответственно, не сможет их подавить. Для этого, согласно принципу расширения фазового пространства, в исходную математическую модель добавляются дополнительные дифференциальные уравнения, используемые для математического описания ненаблюдаемых переменных с неизвестными начальными условиями, но с заранее известными коэффициентами.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= g_0(x, u) + G_1(x)z; \\ \dot{z} &= h_0(x, u) + H_1(x)z.\end{aligned}\quad (1)$$

где x – вектор наблюдаемых переменных,

u – вектор управляющих воздействий,

z – вектор ненаблюдаемых переменных.

Для уже расширенной модели строится асимптотический наблюдатель и проводится процедура синергетического синтеза регулятора методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). В результате полученные законы управления будут, помимо переменных состояния и параметров объекта управ-

ления, содержать в своей структуре косвенные оценки внешних возмущений. И в этом случае синтезированный регулятор будет иметь конкретное математическое представление о действующих внешних возмущениях, в результате чего будет их подавлять. При этом физическая природа оцениваемых возмущений не влияет на точность измерения и степень подавления возмущений. Это могут быть как абстрактные неизвестные возмущения, имеющие определенное направление, так и конкретные возмущения, описываемые известными физическими законами, например, ветро-волновые возмущения.

B. Постановка задачи синергетического синтеза адаптивного регулятора с асимптотическим наблюдателем внешних возмущений

Исходя из приведенного описания метода аналитического конструирования регуляторов с наблюдателями состояния, можно сформулировать постановку задачи синтеза адаптивного регулятора методом АКАР для управления движением СА на режиме глиссирования.

Для решения поставленной задачи управления необходимо сформировать такой вектор управляющих воздействий, который будет:

- обеспечивать асимптотическую устойчивость относительно заданных инвариантов системы управления;
- проводить оценку внешних ветро-волновых возмущений;
- парировать возникающие внешние ветро-волновые возмущения;
- обеспечивать сходимость оценки возмущения с его реальной величиной.

Также стоит отметить, что рассматривается модель только продольного движения СА, а инвариантами для задачи адаптивного управления СА на режиме глиссирования будут являться установившиеся значения скорости и высоты:

$$V = V_0; H = H_0. \quad (2)$$

Выбор этих инвариантов обусловлен узкими эксплуатационными диапазонами режимов устойчивого глиссирования. Для обеспечения установившегося устойчивого глиссирования необходимо не только выдерживать постоянное значение скорости V и угла дифферента ϕ , но и не допустить взлета СА с воды путем контроля высоты H . Для возможности технического обеспечения выбранных инвариантов в продольной модели имеется только 2 физических канала управления: канал по силе тяги двигателя P и канал по углу отклонения руля высоты δ_b . Управляя по двум каналам одновременно, можно получить векторный закон адаптивного управления, обеспечивающий выполнение всех заданных инвариантов одновременно с учетом всех требований к проектируемой системе управления.

Для разработки системы управления в этой работе использовались геометрические, аэродинамические и массово-инерционные характеристики конкретного СА, а именно Бе-200ЧС [1].

C. Получение расширенной математической модели самолета-амфибии на режиме глиссирования

Для описания продольного движения СА на режиме глиссирования используется нелинейная математическая модель продольного движения ЛА:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\vartheta - \theta) + \\ &\quad \frac{qS}{m} (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta) - c_w); \\ \dot{\theta}(t) &= -\frac{g}{V} \cos \theta + \frac{P}{mV} \sin(\vartheta - \theta) + \\ &\quad \frac{qS}{mV} (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta) + c_A); \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{qSb_A}{J_z} (m_z - m_{zh}); \\ \dot{x}(t) &= V \cos \theta; \\ \dot{H}(t) &= V \sin \theta; \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z. \end{aligned} \quad (3)$$

где V – скорость движения самолета,

θ – угол наклона траектории,

ω_z – угловая скорость тангажа,

x – пройденный путь,

H – высота,

ϑ – угол тангажа,

m – масса самолета,

J_z – момент инерции по оси z ,

S – площадь крыла,

q – скоростной напор,

b_A – средняя аэродинамическая хорда крыла,

P – сила тяги [11, 12].

Коэффициенты c_w , c_A и m_{zh} представляют собой гидродинамические коэффициенты сил и продольного момента, возникающих при движении СА на воде.

Очевидно, что для описания глиссирования СА под действием внешних ветро-волновых возмущений система уравнений (3) не подходит, поскольку в её структуре отсутствует математическое описание внешних возмущений. Поэтому, согласно принципу расширения фазового пространства синергетической теории управления, дополним математическую модель (3) дифференциальными уравнениями, позволяющими учесть возникающие внешние возмущения. При этом предполагалось, что возмущения аддитивно входят в правые части дифференциальных уравнений, а их форма носит кусочно-постоянный характер с определенным направлением действия возмущений:

$$\begin{aligned}
 \dot{\vartheta}(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\vartheta - \theta) + \\
 &\quad \frac{qS}{m} (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta) - c_w) + z_1; \\
 \dot{\theta}(t) &= -\frac{g}{V} \cos \theta + \frac{P}{mV} \sin(\vartheta - \theta) + \\
 &\quad \frac{qS}{mV} (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta) + c_A) + z_2; \quad (4) \\
 \dot{\omega}_z(t) &= \frac{qSb_A}{J_z} (m_z - m_{zh}); \\
 \dot{x}(t) &= V \cos \theta; \\
 \dot{H}(t) &= V \sin \theta; \\
 \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z; \\
 \dot{z}_1(t) &= 0; \\
 \dot{z}_2(t) &= 0.
 \end{aligned}$$

IV. ПРОЦЕДУРА СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТОМ-АМФИБИЕЙ В РЕЖИМЕ ГЛИССИРОВАНИЯ

A. Получение базовых законов управления самолетом-амфибией на режиме глиссирования

Процедура синергетического синтеза регулятора методом АКАР для задачи глиссирования СА уже была проведена ранее, а её результаты представлены в [11–16]. В данной работе проводится аналогичная процедура, но с небольшим изменением подхода к заданию агрегированных макропараметров.

Исходя из сформулированных инвариантов системы (2) и расширенной математической модели (4), согласно методу АКАР, зададим совокупность макропараметров, обеспечивающих желаемое поведение проектируемой замкнутой системы управления:

$$\psi_1 = V - V_0; \quad \psi_2 = V \sin \theta - \beta(H - H_0). \quad (5)$$

С учетом введенных макропараметров можно записать основные функциональные уравнения АКАР при условии приравнивания макропараметров (5) к нулю:

$$\begin{aligned}
 T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 &= 0; \\
 T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 &= 0.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Путем подстановки (5) в (6) с учетом расширенной модели (4) были получены базовые законы управления СА на режиме глиссирования, гарантирующие асимптотическую устойчивость относительно заданных инвариантов системы управления.

B. Построение асимптотического наблюдателя внешних возмущений

После проведения стандартной процедуры синтеза регулятора методом АКАР отдельно строится подсистема наблюдателя внешних возмущений.

Согласно уже известной методике построения асимптотического наблюдателя в рамках синергетической теории управления [4–6], первым шагом является составление матриц наблюдателя g_0, G_1, h_0, H_1 , размерность которых зависит от исходной математической модели, а также количества наблюдаемых и ненаблюдаемых переменных.

$$g_0 = \begin{bmatrix} -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\vartheta - \theta) + \\ \frac{qS}{m} (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta) - c_w) \\ -\frac{g}{V} \cos \theta + \frac{P}{mV} \sin(\vartheta - \theta) + \\ \frac{qS}{mV} (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta) + c_A) \\ \frac{qSb_A}{J_z} (m_z - m_{zh}) \\ V \cos \theta \\ V \sin \theta \\ \omega_z \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$h_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Далее, исходя из требований к устойчивости системы и необходимости сходимости внешних возмущений с их косвенными оценками, сформируем матрицу L :

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{13} & l_{14} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

На основании введенных матриц (7) и (8) составим матричное уравнение:

$$G_1 \Gamma = H_1 - L. \quad (9)$$

Для решения уравнения (9) нужно ввести матрицу Γ , элементы которой задаются с учетом обеспечения условия равенства заданных матриц (9):

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & \Gamma_{14} & \Gamma_{15} & \Gamma_{16} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} & \Gamma_{24} & \Gamma_{25} & \Gamma_{26} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Путем решения матричного уравнения (9) получим следующее матричное равенство:

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{11} & -l_{12} \\ -l_{21} & -l_{22} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Следующим шагом вычисляем интеграл матрицы Γ , опираясь на вычисленные элементы матричного выражения (11):

$$\int_0^x \Gamma(x) dx = \begin{bmatrix} -l_{11}V & -l_{12}\theta \\ -l_{21}V & -l_{22}\theta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

где x – количество переменных состояния объекта.

Теперь можно составить уравнения наблюдателя и оценок. Для этого в математическую модель (4) вводится вектор ненаблюдаемых переменных состояния, представляющий собой уравнения наблюдателя:

$$\dot{\hat{y}} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Далее записывается вектор, представляющий собой вектор оценок ненаблюдаемых внешних возмущений:

$$\hat{z} = \int_0^x \Gamma(x) dx - y = \begin{bmatrix} -l_{11}V - l_{12}\theta - z_1 \\ -l_{21}V - l_{22}\theta - z_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Для записи уравнений наблюдателя для сформированного вектора ненаблюдаемых переменных состояния (13) решается матричное выражение:

$$\dot{y} = Ly - L \int_0^x \Gamma(x) dx - h_0 + \Gamma g_0. \quad (15)$$

В результате путем подстановки вектора оценок внешних возмущений (14) в базовые законы управления и в уравнения наблюдателя (13) с учетом матричного выражения (15) были получены аддитивные законы управления вместе с полными формами уравнений асимптотического наблюдателя внешних возмущений.

V. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для проверки корректности полученных законов аддитивного управления была проведена компьютерная верификация в программном пакете математического моделирования MATLAB. Полученные результаты были представлены в виде графиков функций изменения во времени переменных состояния, наиболее явно описывающих динамику СА и определяющих его движение на режиме глиссирования. К подобным переменным состояния относятся скорость V , высота H и угол дифферента φ .

Опираясь на заранее известные эксплуатационные требования, предъявляемые к СА на режиме глиссирования, были выбраны необходимые значения переменных состояния СА. Моделировалось достижение скорости $V = 60$ м/с с одновременным выдерживанием высоты $H = 0$ для исключения вероятности преждевременного взлета, а также с обеспечением нахождения значений угла дифферента $\varphi = 3^\circ \div 7^\circ$ в эксплуатационном диапазоне устойчивых углов дифферента, т.е. в значении, не выходящим за верхнюю и нижнюю границы устойчивости глиссирования. Результаты моделирования представлены на рис. 1–6, где на рис. 1–3 показано обеспечение заданных целей управления без внешних возмущений, а на рис. 4–6 уже вводятся кусочно-постоянные возмущения разного направления.

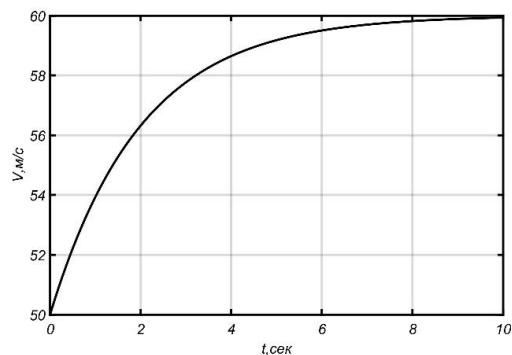


Рис. 1. Изменение скорости V при отсутствии внешних возмущений

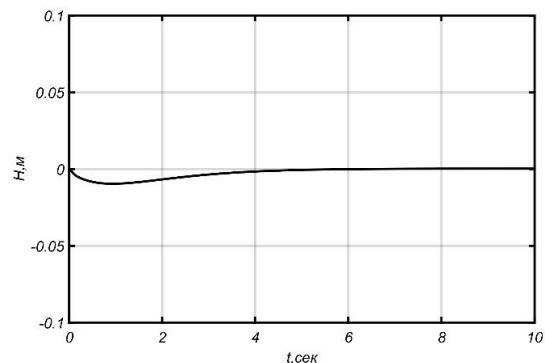


Рис. 2. Изменение высоты H при отсутствии внешних возмущений

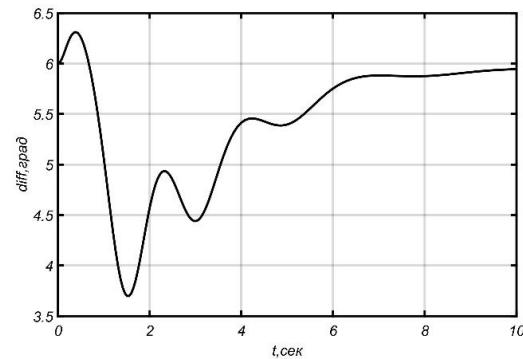


Рис. 3. Изменение угла дифферента φ при отсутствии внешних возмущений

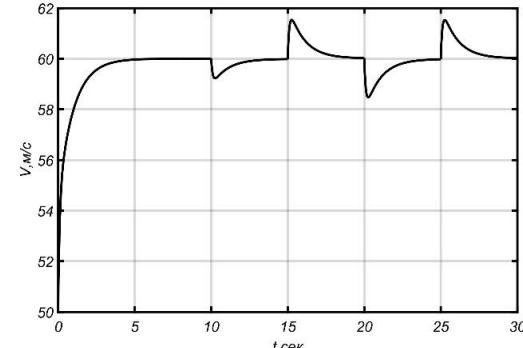


Рис. 4. Изменение скорости V при действующих ветро-волновых возмущениях

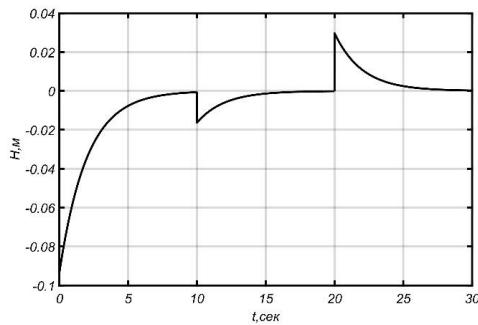


Рис. 5. Изменение высоты H при действующих ветро-волновых возмущениях

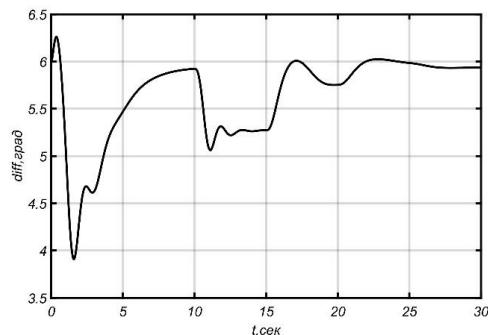


Рис. 6. Изменение угла дифферента φ при действующих ветро-волновых возмущениях

Также для проверки работоспособности синтезированного нелинейного векторного регулятора с асимптотическим наблюдателем внешних возмущений представлены графики действующих на СА возмущений совместно с их полученными косвенными оценками. Из требований к обеспечению асимптотической устойчивости системы управления значения внешних возмущений должны со временем сходиться с их косвенными оценками. Результаты сходимости возмущений с их оценками представлены на рис. 7–10, где на рис. 7 и 8 оценивалась корректность полученных адаптивных законов управления и синтезированного наблюдателя, а на рис. 9 и 10 проверялась сходимость заданных кусочно-постоянных возмущений разного направления с их оценками.

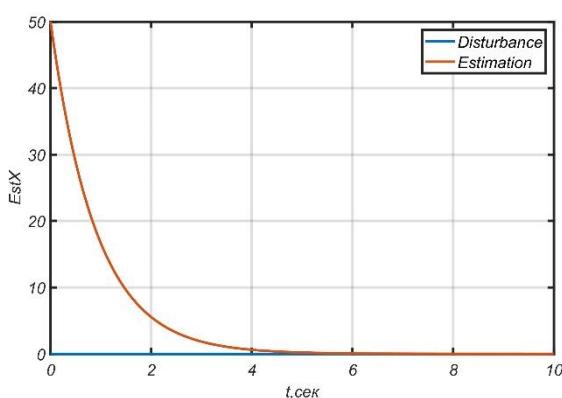


Рис. 7. Сходимость косвенной оценки возмущения с его реальным значением по оси X при отсутствии возмущений

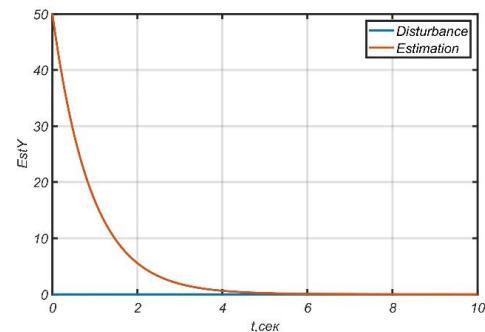


Рис. 8. Сходимость косвенной оценки возмущения с его реальным значением по оси Y при отсутствии возмущений

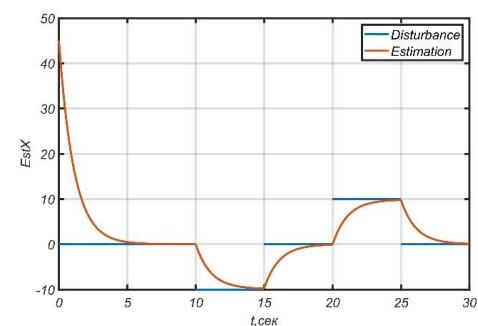


Рис. 9. Сходимость косвенной оценки возмущения с его реальным значением по оси X при действующих ветро-волновых возмущениях

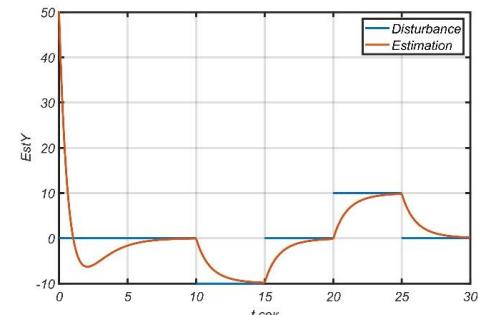


Рис. 10. Сходимость косвенной оценки возмущения с его реальным значением по оси Y при действующих ветро-волновых возмущениях

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен прикладной метод синергетического синтеза адаптивного регулятора с асимптотическим наблюдателем внешних возмущений, применимый для задачи управления СА на режиме глиссирования в условиях постоянных ветро-волновых возмущений. По результатам проведенного компьютерного моделирования видно, что синтезированный адаптивный регулятор не только обеспечивает выполнение заданных инвариантов системы, но и успешно парирует возникающие внешние ветро-волновые возмущения. Результаты данной работы могут быть использованы для проектирования нового класса адаптивных автопилотов, в перспективе применимых для управления СА на сложных эксплуатационных режимах его движения на воде совместно с учетом влияния факторов и особенностей внешней среды на его динамические параметры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самолет-амфибия Бе-200ЧС РЛЭ. – Таганрог: ТАНТК им. Г.М. Бернева, 2003. – 394 с.
2. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. – 447 с.
3. Андреевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. – СПб.: Наука, 1999. – 466 с.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
5. Колесников А.А., Балалаев Н.В. Синергетический синтез нелинейных систем с наблюдателями состояний // Новые концепции общей теории управления. – 1995. – С. 101-113.
6. Колесников А.А., Балалаев Н.В., Веселов Г.Е., Топчев Б.В. Методы синергетического синтеза адаптивных регуляторов // Синергетика и проблемы теории управления. – 2004. – С. 204-226.
7. Радионов И.А. Синергетический наблюдатель составляющих вектора потокосцепления ротора асинхронного электропривода // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 219-229.
8. Радионов И.А. Способ оценки текущего момента сцепления в контакте "Колесо-рельс" // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 5 (166). – С. 243-251.
9. Игун Ф. Синергетический синтез законов управления движением гидросамолета с нелинейным наблюдателем состояния // Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления: Тезисы докладов IX Всероссийской научной конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.
10. Игун Ф. Исследование и построение модели возмущающих воздействий внешней среды при взлете гидросамолета // Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления: Тезисы докладов IX Всероссийской научной конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.
11. Веселов Г.Е., Попов И.А. Синергетический синтез алгоритма управления режимом глиссирования самолета-амфибии в условиях ветроволновых возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2024. – Т. 25, № 8. – С. 425-435.
12. Попов И.А. Синергетический синтез автопилота для управления движением самолета-амфибии Бе-200 во время забора воды // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 229.
13. Попов И.А. Синергетический синтез автопилота для управления движением самолета-амфибии Бе-200ЧС при заборе воды // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции, п. Нижний Архыз, 27 сентября – 01 2022 года. – Ростов-на-Дону – Таганрог: ЮФУ, 2022. – С. 55-60.
14. Попов И.А. Процедура применения синергетического синтеза для управления движением самолета-амфибии Бе-200 при заборе воды в режиме глиссирования // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей IX Всероссийской научно-технической конференции, 10–15 апреля 2023 года. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2023. – С. 164-166.
15. Попов И.А. Синергетический синтез автопилота самолета-амфибии для реализации режима «посадка на воду – глиссирование – взлет с водой» // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2023. – Т. 1. – С. 23-27.
16. Попов И.А. Процедура синергетического синтеза астатического регулятора для задачи установившегося глиссирования самолета-амфибии в условиях регулярного морского волнения // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей X Всероссийской научно-технической конференции, 15–21 апреля 2024 года. – Таганрог: ЮФУ, 2024.

Синергетический синтез системы управления продольным движением самолета-амфибии Бе-200 в режиме сброса воды при тушении пожара

Тур Андрей Александрович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности,
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

atur@sfedu.ru

Веселов Геннадий Евгеньевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности,
Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

gev@sfedu.ru

Аннотация. В работе рассмотрено влияние восходящего потока воздуха от пожара на динамику полета самолета-амфибии в режиме сброса воды над очагом возгорания, проведен синтез синергетических систем управления для данного режима функционирования самолета-амфибии. Проведенный анализ показал необходимость использования метода интегральной адаптации на инвариантных многообразиях для эффективного решения данной задачи. Синтезированная система с интегральной адаптацией продемонстрировала инвариантность к действию внешних возмущений и изменению параметров самолета-амфибии, возникающие в результате сброса воды.

Abstract. The paper considers the influence of the ascending air flow from a fire on the dynamics of the amphibious aircraft flight in the mode of water discharge over the fire source, the synthesis of synergistic control systems for this mode of operation of the amphibious aircraft is carried out. The analysis showed the need to use the integral adaptation method on invariant manifolds for an effective solution to this problem. The synthesized system with integral adaptation demonstrated invariance to the action of external disturbances and changes in the parameters of the amphibious aircraft, arising as a result of water discharge.

Ключевые слова: автоматическое управление, метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов, синтез регулятора, синергетическая теория управления, интегральная адаптация.

Keywords: automatic control, method of analytical design of aggregated regulators, regulator synthesis, synergic control theory, integral adaptation.

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема тушения пожаров является одним из важнейших вопросов человечества. Так площадь лесных пожаров в России в 2023 году втрое превысило показатели предшествующего года, нанося невосполнимый вред природе, негативно влияя на экономику и социальную сферу. Аналогичные ситуации и во многих других странах, таких как Турция, Бразилия, Индия, Франция, Португалия, США и д. р. Лесной ландшафт, пересеченная местность затрудняют доставку воды наземными способами. Учитывая сложности, продиктованные местностью, для эффективного решения проблемы ликвидации возгораний, необходимо обеспечить быструю доставку большого объема воды или огнегасящей жидкости

(ОЖ) к труднодоступным, для тушения, очагам возгорания. Обеспечивая возможность набора воды с водоема или на взлетно-посадочной площадке (ВПП) до 12 тонн, быстрой доставки ее к месту возгорания и сброса воды или ОЖ непосредственно над пожаром, многоцелевой самолет-амфибия (СА) Бе-200 становится самым востребованным и эффективным средством пожаротушения в мире. Однако, такая многозадачность для СА требует от конструкторов обеспечить решение многих специфических технических задач, таких как: посадка на воду, посадка на ВПП, полет над очагом возгорания при воздействии на самолет восходящих потоков воздуха от пожара, забор воды на глиссаде, сброс воды в непосредственной близости от земли с учетом резкого изменения массы самолета, ведущее к изменению его центровки. Сложность выполнения данных маневров для летчика, диктуется наличием многих непредвиденных факторов, которые увеличивают риск катастрофы. Система управления, в режиме сброса воды и при воздействии на СА восходящих воздушных потоков, является объектом исследования в данной работе.

Рассматривая СА, как объект управления, необходимо провести анализ процесса тушения пожара и влияние внешних факторов на динамику полета самолета. Восходящие потоки воздуха от лесного пожара могут значительно повлиять на атмосферные условия и ветровые течения в данной области. Под воздействием пламени воздушная масса начинает разогреваться и подниматься вертикально вверх, создавая восходящие потоки воздуха или термики, способные изменять структуру атмосферы и воздушных течений над очагом возгорания. Характерная скорость восходящих потоков составляет 5–7 м/с [1]. СА, двигаясь равномерно и прямолинейно, входит в зону возгорания, где испытывает воздействие потока разогретого воздуха, который парирует летчик путем отклонения органов управления. При сбросе воды или ОЖ происходит изменение массы и центровки самолета, что может привести к пикированию. Покидая зону возгорания, воздействие восходящего потока прекращается, что так же приходиться учитывать летчику, не допуская выхода самолета на отрицательные углы тангажа. Достаточно часто допускается описание воздействия потоков разогретого воздуха над очагом пожара в виде синусоидальной зависимости (рис. 1) [2].

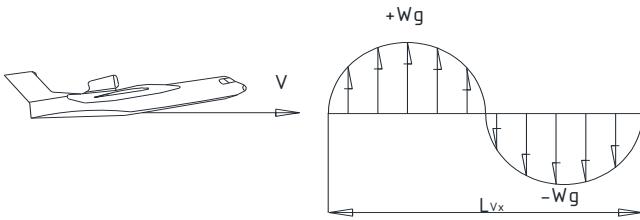


Рис. 1. Движение самолета в синусоидальном турбулентном поле

Проблемой проектирования систем управления самолетами занимается значительное количество исследователей на протяжении многих лет. Основной целью этих исследований является разработка систем управления, способных гарантировать выполнение заданной технологической задачи полета и обеспечить надежность и устойчивость воздушного судна. Однако, достаточно часто, при проведении этих исследований вводятся допущения, существенно сужающие область работы проектируемых систем. Это объясняется тем, что математическая модель самолета имеет существенный нелинейный характер и большинство методов синтеза систем управления не способны учсть данные нелинейные особенности модели движения самолета и требуют проведение процедур понижения порядка модели системы, а также иногда и ее линеаризации [3–6].

Тенденция роста спроса в авиационной отрасли, требует повышение безопасности полета и сохранности людей, что способствует развитию и появлению новых подходов и методов к решению проблемы автоматического управления движением самолетов. На наш взгляд одним из самых перспективных подходов к синтезу систем управления сложными многомерными и многосвязанными нелинейными объектами, к которым безусловно относится СА, является подход, предложенный профессором А.А. Колесниковым [7] и названный синергетической теорией управления (СТУ). Основным методом данного подхода является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который нашел достойное применение во многих сферах при проектировании систем управления объектами, обладающими сложной нелинейной динамикой. Безусловно, что данный подход применяется и при проектировании систем управления различными режимами полета различных классов самолетов [6, 8–13], в том числе и СА [8–11]. Однако, при синтезе систем управления СА ранее не рассматривалась проблема изменения массы самолета при сбросе воды или ОЖ в совокупности с действием воздушных потоков воздуха.

Таким образом является целесообразно рассмотреть задачу управления СА в режиме сброса воды при тушении пожара и решить ее методом АКАР.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ САМОЛЕТА В РЕЖИМЕ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

При осуществлении маневра по тушению пожара СА, как правило, осуществляется движение только в продольной плоскости. Поэтому из всего разнообразия математических моделей самолетов рассмотрим модель движения СА в продольной плоскости [3–6]:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{\rho V_k^2 S}{2m} (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta)) + W_k; \\ \dot{\theta}(t) &= -\frac{g}{V_k} \cos \theta + \frac{P}{m V_k} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{\rho V_k S}{2m} (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta)) + W_g; \quad (1) \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{\rho V_k^2 S b_A}{2 J_z} m_z; \\ \dot{x}(t) &= V_k \cos \theta \cos \Psi; \\ \dot{H}(t) &= V_k \sin \theta; \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z, \end{aligned}$$

где V_k – курсовая скорость движения самолета, θ – угол наклона траектории, ω_z – угловая скорость тангажа, x – пройденный путь, H – высота полета, ϑ – угол тангажа (дифферента), m – масса самолета, J_z – момент инерции по оси z ; S – площадь крыла, ρ – плотность воздуха; b_A – средняя аэродинамическая хорда крыла, Ψ – текущее значение путевого угла, φ – угол между вектором тяги и осью $0x$ связанный системы координат, P – сила тяги, создаваемая двигателями СА, W_k , W_g – проекции ветровых возмущений. Модель (1) необходимо дополнить выражениями для аэродинамических сил c_x , c_y и момента m_z :

$$\begin{aligned} c_x &= c_x^0 + c_x^\alpha \alpha + c_x^{\delta_B} \delta_B; \\ c_y &= c_y^0 + c_y^\alpha \alpha + c_y^{\delta_B} \delta_B; \quad (2) \\ m_z &= m_z^\alpha \alpha + \frac{m_z^{\omega_z}}{V_k} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B, \end{aligned}$$

где параметры c_x^0 , c_x^α , $c_x^{\delta_B}$, c_y^0 , c_y^α , $c_y^{\delta_B}$, m_z^0 , m_z^α , $m_z^{\delta_B}$ определяются в результате обдувки фюзеляжа СА, δ_B – угол отклонения руля высоты, $\alpha = \vartheta - \theta$ – угол атаки.

Управляющими воздействиями в математической модели продольного движения СА (1), (2) являются сила тяги двигателей P и изменение угла установки руля высоты δ_B .

В режиме сброса воды или ОЖ на очаг возгорания у СА происходит изменение массы, что влечет отклонение его центра массы и моментов инерции. Так если предполагать, что при полностью заполненных баках масса СА примерно равна 42000 кг, то плечо от центра тяжести до аэродинамического центра давления L составляет 1,956 м, а при массе СА 31000 кг $L = 2,0918$ м. При этом момент инерции $J_z = L^2 m$. Поэтому если происходит полный сброс воды, при котором масса СА примерно за 2 с изменяется с 42000 кг до 30000 кг (рис. 2), то это влечет изменение и момента инерции (рис. 3).

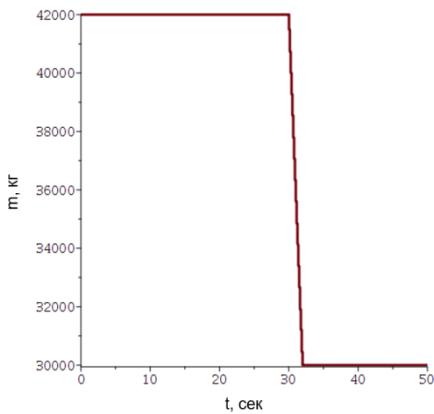


Рис. 2. Изменение массы СА

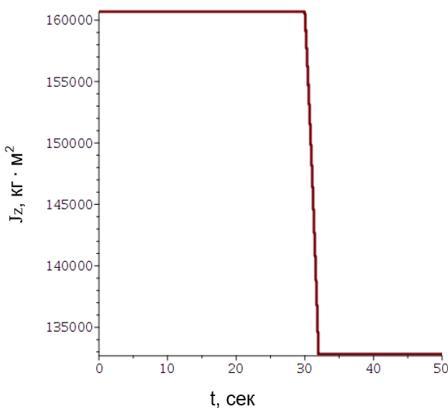


Рис. 3. Изменение момента инерции

Кроме того, на СА оказывают воздействие ветровые потоки. При рассматриваемом режиме полета на СА воздействует поток ветра вдоль плоскости движения W_k , а также восходящие потоки воздуха W_g . При этом проекция ветрового потока W_k характеризуется порывами ветра, которые могут иметь характер, изображенный на рис. 4, проекция W_g помимо порывов ветра также может иметь и турбулентный характер (рис. 5).

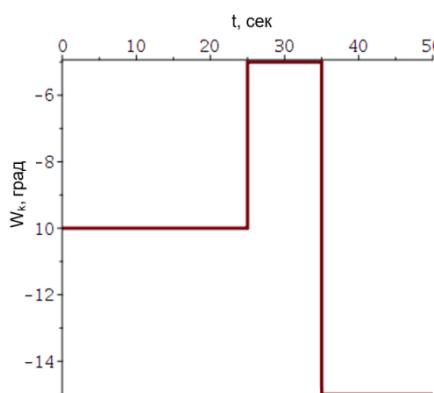


Рис. 4. Изменение проекции ветрового потока W_k

Таким образом математическая модель (1), (2) с учетом параметрических (рис. 2 и 3) и внешних возмущений (рис. 4 и 5) описывает поведение СА в режиме сброса воды на очаг возгорания.

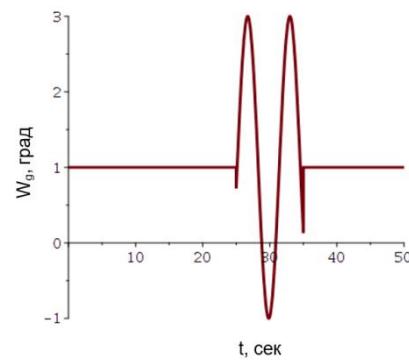


Рис. 5. Изменение проекции ветрового потока W_g

III. СИНТЕЗ БАЗОВОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ СА

Рассмотрим процедуру синергетического синтеза системы управления СА с использованием классического метода АКАР [7]. При проведении процедуры синтеза будем предполагать, что параметрические и внешние возмущения отсутствуют, то есть масса СА является постоянной и полет осуществляется при отсутствии ветра.

В соответствии с процедурой метода АКАР необходимо определить инварианты проектируемой системы, которые будут отражать цели управления. Очевидно, что в продольной плоскости для данного режима полета необходимо обеспечить стабилизацию курсовой скорости V_k , а так осуществлять полет на заданной высоте H . Тогда система инвариантов для проектируемой системы может быть представлена как

$$\begin{aligned} V_k^0 - V_k &= 0; \\ H^0 - H &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где V_k^0 – требуемое значение курсовой скорости движения самолета, H^0 – требуемая высота полета.

В результате анализа математической модели (1), (2) и сформированной системы инвариантов (3) определяем первую совокупность макропараметров

$$\begin{aligned} \psi_1^{(1)} &= V_k^0 - V_k; \\ \psi_2^{(1)} &= \sin \theta - \varphi_1, \end{aligned} \quad (4)$$

удовлетворяющую решению $\dot{\psi}_i^{(1)} = 0$, $i = 1, 2$ системы функциональных уравнений

$$\begin{aligned} T_1^{(1)} \dot{\psi}_1^{(1)}(t) + \psi_1^{(1)} &= 0; \\ T_2^{(1)} \dot{\psi}_2^{(1)}(t) + \psi_2^{(1)} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $T_1^{(1)}$, $T_2^{(1)}$ – положительные константы, характеризующие время попадания изображающей точки (ИТ) проектируемой системы из произвольных начальных условий в окрестность пересечения многообразий $\bigcap_{i=1}^2 \psi_i^{(1)} = 0$, φ_1 – непрерывная функция от переменных системы, значение которой будет определено в результате дальнейшей процедуры синтеза.

Через промежуток времени, при котором осуществляется попадание ИТ системы в окрестность пересечения многообразий $\bigcap_{i=1}^2 \psi_i^{(1)} = 0$, поведение замкнутой системы можно описать декомпозированной системой дифференциальных уравнений

$$\dot{\omega}_z(t) = \frac{\rho(V_k^0)^2 S b_A}{2 J_z} \left(\frac{m_z^a (\vartheta - \arcsin \varphi_1) +}{+ \frac{m_z^{\omega_z}}{V_k^0} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B} \right), \quad (6)$$

$$\dot{x}(t) = V_k^0 \sqrt{1 - \varphi_1^2} \cos \Psi;$$

$$\dot{H}(t) = V_k^0 \varphi_1;$$

$$\dot{\vartheta}(t) = \omega_z,$$

в которой φ_1 является так называемым в методе АКАР «внутренним управлением» проектируемой системы. Таким образом на втором этапе синтеза для системы (6) введем макропараметрную

$$\psi_1^{(2)} = H^0 - H, \quad (7)$$

удовлетворяющую решению $\psi_1^{(2)} = 0$ функционального уравнения

$$T_1^{(2)} \dot{\psi}_1^{(2)}(t) + \psi_1^{(2)} = 0, \quad (8)$$

где положительный коэффициент $T_1^{(2)}$ определяет время движения ИТ после попадания на пересечение $\bigcap_{i=1}^2 \psi_i^{(1)} = 0$ на инвариантное многообразие $\psi_1^{(2)} = 0$.

Из совместного решения (7) и (8) с учетом декомпозированной модели (6) находим выражение для внутреннего управления

$$\varphi_1 = \frac{H^0 - H}{T_1^{(2)} V_k^0}. \quad (9)$$

В свою очередь из совместного решения (4) и (5), с учетом (9) и исходной математической модели (1), (2) получаем выражения для управляющих воздействий: изменение силы тяги двигателей P и изменение угла установки руля высоты δ_B . Ввиду громоздкости и малой информативности аналитические выражения синтезированного базового закона управления СА в рамках статьи не приводятся. Однако следует отметить, что этот закон управления гарантирует асимптотически устойчивое поведение синтезированной системы относительно введенной совокупности инвариантных многообразий, а также выполнение целей управления, сформулированных в виде системы инвариантов (3).

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СА С БАЗОВЫМ ЗАКОНОМ УПРАВЛЕНИЯ

Проведем исследование синтезированной системы при отсутствии внешних и параметрических возмущений. На рис. 6 и 7 представлены графики изменения курсовой скорости и высоты полета СА.

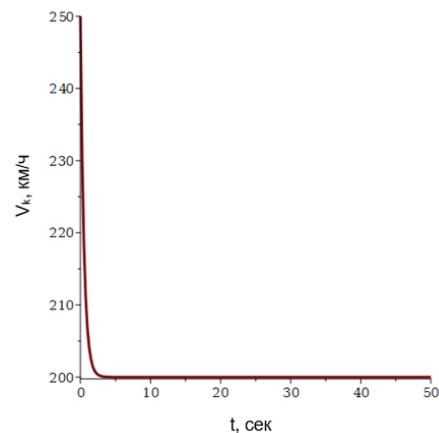


Рис. 6. График изменения курсовой скорости СА

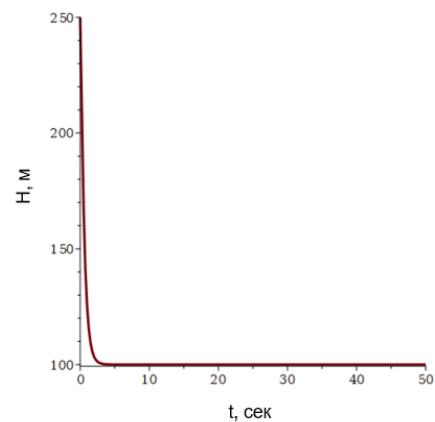


Рис. 7. График изменения высоты полета СА

Как видно из результатов моделирования в идеальных условиях базовый закон управления выполняет заданную задачу управления с высокой точностью. СА выходит на требуемую высоту полета с заданной курсовой скоростью. Далее проанализируем работу базового закона управления, когда осуществляется сброс воды в соответствии с графиками 2 и 3. При моделировании предполагалось, что в базовом законе управления коэффициенты остаются неизменными и соответствуют номинальным расчетным значениям, а в математической модели СА масса и момент инерции изменяются. Результаты представлены на рис. 8 и 9.

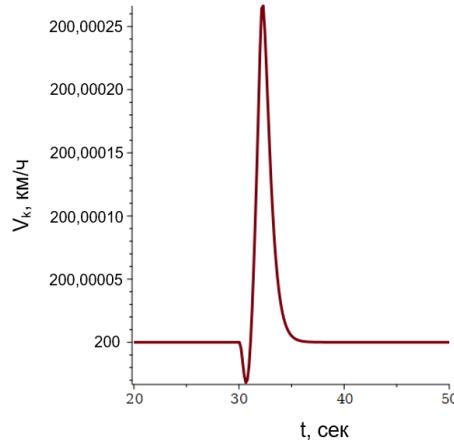


Рис. 8. Изменение скорости в момент сброса воды

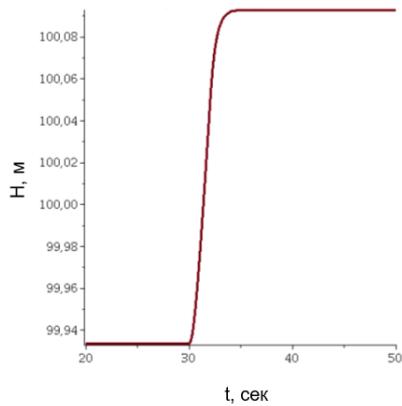


Рис. 9. График изменения высоты полета

Из представленных результатов моделирования можно сделать вывод, что изменение массы СА не влияет существенных отклонений по регулируемым переменным. При этом на скорость СА эти изменения практически вообще не влияют, а высота полета более чувствительна, но ее отклонения от требуемого состояния находятся в рамках допустимых значений.

На следующем этапе исследования к параметрическим возмущениям добавим также внешние возмущения ветрового потока (рис. 4 и 5). На рис. 10 и 11 представлены результаты моделирования.

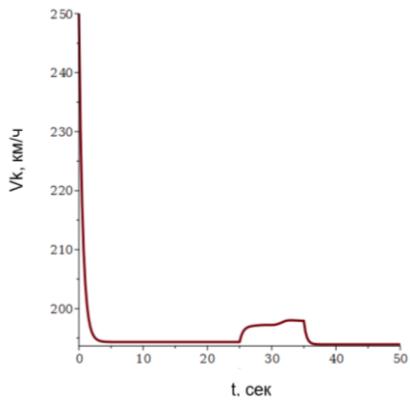


Рис. 10. График изменения курсовой скорости СА

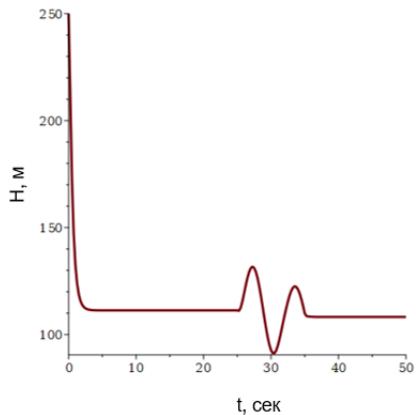


Рис. 11. График изменения высоты полета СА

Ветровые возмущения оказывают более существенное влияние на точность работы системы, но при этом не влияют на устойчивость синтезированной системы. Таким образом из результатов исследования замкнутой

системы управления СА с базовым законом управления можно сделать вывод, что базовый закон управления гарантирует асимптотическую устойчивость системы, низкую чувствительность замкнутой системы к изменению параметров, но достаточно сильное влияние оказывают внешние воздействия в виде ветровых потоков. Поэтому для повышения точности проектируемых систем необходимо использовать модернизированные процедуры синтеза регуляторов. Одна из таких процедур определена в методе интегральной адаптации на инвариантных многообразиях [14, 15].

V. СИНТЕЗ ВЕКТОРНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ СА С ИНТЕГРАЛЬНОЙ АДАПТАЦИЕЙ

С целью снижения чувствительности проектируемой системы к воздействию параметрических и внешних воздействий применим процедуру метода интегральной адаптации на инвариантных многообразиях СТУ [14, 15]. В соответствии с процедурой метода на первом этапе необходимо составить расширенную модель синергетического синтеза. Для этого к базовой модели (1), (2) дополняются, в данном случае, два уравнения оценки действия возмущений следующего вида

$$\begin{aligned}\dot{z}_1(t) &= \eta_1(V_k^0 - V_k); \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2(H^0 - H),\end{aligned}\quad (10)$$

где z_1 , z_2 – переменные оценки возмущений, η_1 , η_2 – постоянные коэффициенты, с помощью которых обеспечивается устойчивость и скорость процесса оценки. При этом в исходной модели (1) также осуществляется замена проекций ветровых возмущений W_k и W_g заменяются оценками z_1 и z_2 соответственно. С учетом (10) и осуществленной замены математическая модель синергетического синтеза алгоритмов управления с интегральной адаптацией на инвариантных многообразиях продольным движением СА включает в себя помимо уравнений аэродинамических сил и моментов (2) расширенную модель

$$\begin{aligned}\dot{V}_k(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\varphi + \Psi - \theta) + \\ &+ \frac{\rho V_k^2 S}{2m} (c_x \cos(\Psi - \theta) - c_y \sin(\Psi - \theta)) + z_1; \\ \dot{\theta}(t) &= -\frac{g}{V_k} \cos \theta + \frac{P}{m V_k} \sin(\varphi + \Psi - \theta) + \\ &+ \frac{\rho V_k S}{2m} (c_x \sin(\Psi - \theta) + c_y \cos(\Psi - \theta)) + z_2; \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{\rho V_k^2 S b_A}{2 J_z} m_z; \\ \dot{x}(t) &= V_k \cos \theta \cos \Psi; \\ \dot{H}(t) &= V_k \sin \theta; \\ \dot{\Psi}(t) &= \omega_z; \\ \dot{z}_1(t) &= \eta_1(V_k^0 - V_k); \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2(H^0 - H).\end{aligned}\quad (11)$$

Дальнейшая процедура синтеза векторного алгоритма управления с интегральной адаптацией на инвариантных многообразиях полностью совпадает с процедурой синтеза с использованием метода АКАР, выполненной выше. В связи с чем повторять ее не будем. Следует только отметить, что в результате применения этой процедуры с использованием математической модели синергетического синтеза (11), (2) структура синтезированной системы управления будет включать интегральные оценки действия возмущений (10), что обеспечить снижение ее чувствительности к действию этих возмущений.

VI. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПАРВЛЕНИЯ С ИНТЕГРАЛЬНОЙ АДАПТАЦИЕЙ НА ИНВАРИАНТНЫХ МНОГООБРАЗИЯХ

Проведем исследование синтезированной системы с интегральной адаптацией на инвариантных многообразиях продольным движением СА в режиме сброса воды над очагом пожара, то есть с учетом изменения массы СА и действии ветровых возмущений. Результаты моделирования представлены на рис. 12 и 13.

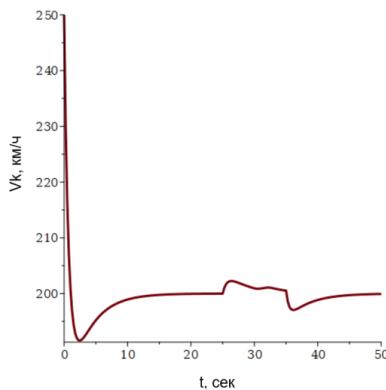


Рис. 12. График переходного процесса относительно курсовой скорости СА

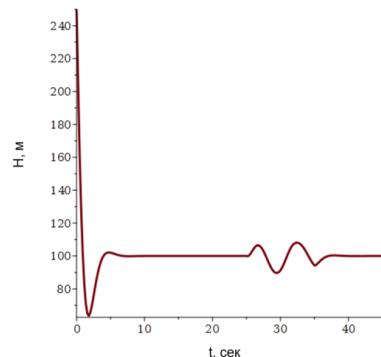


Рис. 13. График переходного процесса относительно высоты полета СА

Проведенные исследования подтверждают, что в системе с интегральной адаптацией существенно меньше чувствительность к параметрическим и внешним возмущениям. При этом следует отметить, что синтезированная система инварианта к действию кусочно-постоянных возмущений, однако она не полностью нейтрализует влияние действий гармонического типа. Для того чтобы учесть в полной мере гармонические воздействия и нейтрализовать их влияние в замкнутой системе при синтезе алгоритмов управления необходимо использовать метод интегральной адаптации на инвариантных многообразиях повышенного порядка [16].

VII. Выводы

В данной статье была рассмотрена процедура синергетического синтеза законов управления движением СА в режиме пожаротушения при условии воздействия восходящего потока воздуха и изменения массы при сбросе воды. Результаты проведенного компьютерного моделирования, исследуемого процесса, подтверждают обеспечение асимптотическая устойчивость движения СА в заданном режиме в необходимом диапазоне быстродействия, что обеспечивает повышение безопасности при выполнении летных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леженин А.А., Мальбахов В.М., Шлычков В.А. Численная модель миграции аэрозоля, образовавшегося в зоне лесных пожаров // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16, № 05–06. – С. 478-481.
2. Wang B.H., Wang D.B., Ali Z.A., Ting Ting B., Wang H. An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle // Measurement and Control. – 2019. – Vol. 52, No. 7–8. – P. 731-739.
3. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
4. Бюоэнс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолёта: Пространственное движение. – М.: Машиностроение, 1983.
5. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Современные направления синтеза систем автоматического управления ЛА // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 2004. – № 2. – С. 126-136.
6. Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. – М.: Физматлит, 2013.
7. Колесников А.А. Синергетическая теория управления – М.: Энергоатомиздат, 1994.
8. Кобзев В.А., Колесников А.А., Нгуен Ф. Проблемы управления взлетом гидросамолетов в условиях действия возмущений внешней среды // Сборник докладов VIII научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008». – М.: Изд-во ЦАГИ, 2008. – С. 56-67.
9. Колесников А.А., Кобзев В.А., Нгуен Ф. Синергетический синтез систем управления движением самолетов-амфибий, функционирующих в экстремальных условиях // Известия ЮФУ Технические науки. – 2010. – № 5. – С. 150-55.
10. Kreerenko O.D., Kreerenko E.S. Synthesis of control laws of aerospace system based on a synergistic approach // 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2016. 25–30 сентября 2016 г.
11. Веселов Г.Е., Попов И.А. Синергетический синтез алгоритма управления режимом глиссирования самолета-амфибии в условиях ветроволновых возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2024. – Т. 25, № 8. – С. 425-435.
12. Веселов Г.Е., Ингабире А. Синергетический синтез закона управления БПЛА в условиях ветровых возмущений с входными ограничениями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 101-112.
13. Веселов Г.Е., Ингабире А. Метод синергетического синтеза законов управления беспилотными летательными аппаратами при пространственном движении в условиях ветровых возмущений // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 38-45.
14. Колесников А.А. Метод интегральной адаптации нелинейных систем на инвариантных многообразиях: наихудшие возмущения // Материалы 6-й научной конференции «Управление информационные технологии» (УИТ-2010). – СПб.: Изд-во «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 22-28.
15. Колесников А.А., Колесников А.А., Кузьменко А.А. Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 9. – С. 579-589.
16. Кузьменко А.А. Интегральная адаптация высокого порядка в задачах синтеза нелинейных систем управления // Информатика и системы управления. – 2018. – № 1 (55). – С. 142-153.

Проблема управления манипуляторами на БПЛА мультироторного типа

Веселов Геннадий Евгеньевич
Институткомпьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
gev@sfedu.ru

Лихтин Семён Сергеевич
Институткомпьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
lihtin@sfedu.ru

Аннотация. В статье приводится обзор и сравнение современных методов управления манипуляторами, установленными на квадрокоптерах. Рассмотрены три подхода, которые нашли наибольшее применение в решении данной задачи: синергетическое управление с конечным временем, управление на основе модели Лагранжа и гибридное адаптивное управление. В статье подробно описаны математические основы каждого метода, их преимущества и недостатки, а также обсуждены возможности их применения в различных практических задачах. Основные выводы показывают, что гибридное адаптивное управление обладает наибольшей универсальностью и устойчивостью в условиях изменяющихся внешних воздействий.

Abstract. The article provides an overview and comparison of modern methods for controlling manipulators installed on quadcopters. Three approaches are considered: finite-time synergistic control, Lagrangian-based control, and hybrid adaptive control. The article provides a detailed description of the mathematical foundations of each method, their advantages and disadvantages, and discusses their potential applications in various practical tasks. The main conclusions indicate that hybrid adaptive control offers the greatest versatility and robustness under changing external conditions.

Ключевые слова: управление манипуляторами, квадрокоптеры, синергетическое управление, адаптивное управление, Лагранжева динамика.

Keywords: manipulator control, quadcopters, synergistic control, adaptive control, Lagrangian dynamics.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные беспилотные летательные аппараты квадрокоптерного типа (БПЛА) находят широкое применение в различных областях, включая мониторинг окружающей среды, сбор данных, инспекцию труднодоступных объектов [1] и даже участие в спасательных операциях. В последние годы особое внимание уделяется разработке БПЛА, оснащенных роботизированными манипуляторами, пример на рис. 1.

Это значительно расширяет функциональные возможности этих устройств. Такие системы позволяют не только наблюдать и анализировать объекты, но и активно взаимодействовать с окружающей средой, выполняя сложные манипуляционные задачи, такие как сборка, ремонт, транспортировка объектов [2]. Шэньянский ин-

ститут автоматизации разработал гексакоптерный БПЛА, представленный на рис. 2, оснащенный механической рукой с пятью степенями свободы, способной захватывать объекты на открытом воздухе с помощью GPS и других вспомогательных устройств [3].

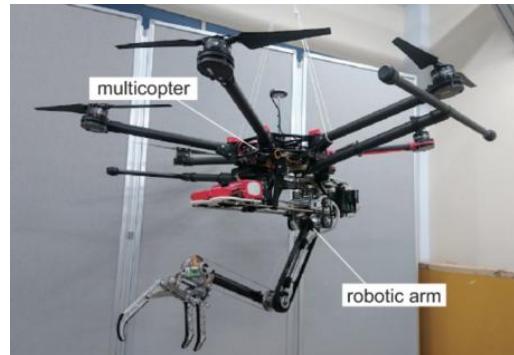


Рис. 1. БПЛА с роботизированным манипулятором

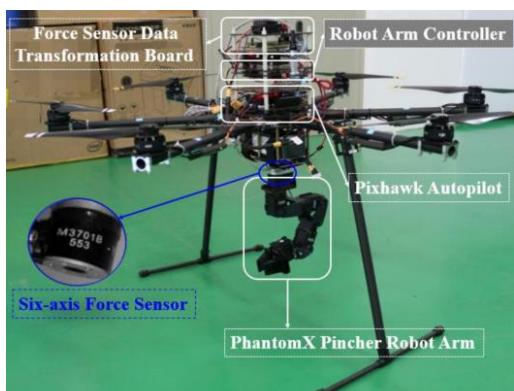


Рис. 2. Гексакоптерный БПЛА и манипулятор с 5 степенями свободы

Тяньцзиньский университет использовал систему захвата 3D-движения для позиционирования квадрокоптерного БПЛА и разработал автономную систему захвата, как на рис. 3, для БПЛА способную работать внутри помещений [4].

Исследователи из Сеульского национального университета создали летающую систему манипулятора, вдохновленную оригами, включающую складной манипулятор, представленный на рис. 4, приводимый в действие сухожилиями. Этот складной манипулятор позволяет

беспилотным летательным аппаратам выполнять задачи в районах, где посадка небезопасна, например, сбор образцов из трещин на пересеченной местности [5].

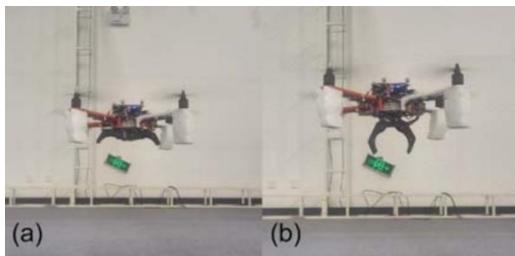


Рис. 3. Захват на квадрокоптере с одной степенью свободы



Рис. 4. Складной манипулятор на мультироторном БПЛА

В статье [6] авторы разработали алгоритм позволяющий мультироторному БПЛА, с установленным манипулятором, у которого множество степеней свободы, захватывать цилиндрические объекты ориентируясь по изображению с камеры и алгоритмам компьютерного зрения как показано на рис. 5.

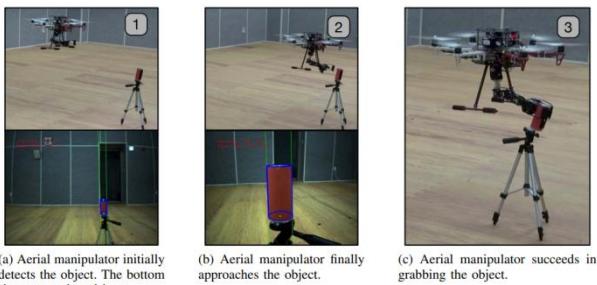


Рис. 5. Полёт и изображения с камеры во время эксперимента

Управление манипулятором, установленным на БПЛА, представляет собой сложную задачу, обусловленную необходимостью одновременного учета динамики как самого БПЛА, так и манипулятора. Взаимодействие этих двух подсистем требует разработки высокоэффективных алгоритмов управления, способных обеспечить стабильность и точность системы в условиях различных внешних воздействий и внутренних возмущений.

В рамках данной статьи рассмотрим и проанализируем современные методы управления поведением системами, состоящими из манипулятора и БПЛА. В ходе анализа будут подробно описаны математические основы каждого метода, оценены их преимущества и недостатки, а также обсуждены возможности применения этих подходов в различных практических задачах. Статья

также включает сравнительный анализ методов, что позволит определить наиболее перспективные подходы для дальнейших исследований и разработок.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В статье [7] описана математическая модель БПЛА типа «квадрокоптер». На рис. 6 указана локальная система координат рамы БПЛА(x, y, z) и углы ориентации (ϕ, θ, ψ).

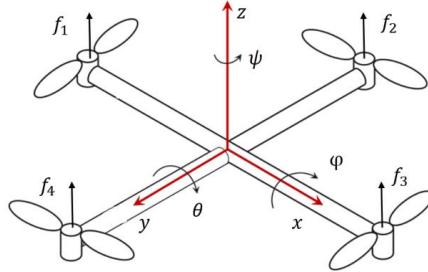


Рис. 6. Система координат квадрокоптера и углы ориентации

Связь между двумя системами координат можно описать в виде матрицы:

$$\begin{bmatrix} c\psi \cdot c\theta & c\psi \cdot s\phi \cdot s\theta - s\psi \cdot c\phi & c\psi \cdot c\phi \cdot s\theta + s\phi \cdot s\psi \\ s\psi \cdot c\theta & s\phi \cdot s\psi \cdot s\theta + c\phi \cdot c\psi & s\psi \cdot c\phi \cdot s\theta - c\psi \cdot s\phi \\ -s\theta & s\phi \cdot c\theta & c\phi \cdot c\theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где s и c обозначают \sin и \cos соответственно.

Четыре ротора создают как подъемную силу, так и управляющие моменты. В зависимости от направлений вращения пропеллеров они могут создавать моменты относительно осей x_b, y_b, z_b .

Подъемная сила каждого ротора описывается выражением

$$F_i = k_f \omega_i^2, \quad (2)$$

где k_f – коэффициент подъемной силы, ω_i – угловая скорость i -го ротора.

$$M_i = k_m \omega_i^2, \quad (3)$$

где k_m – коэффициент, описывающий момент, создаваемый ротором.

Управляющие моменты вокруг осей:

- вокруг оси x_b (крен)

$$M_x = l(F_2 - F_4); \quad (4)$$

- вокруг оси y_b (тангаж)

$$M_y = l(F_1 - F_3); \quad (5)$$

- вокруг оси z_b (рыскание):

$$M_z = k_m(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2), \quad (6)$$

где l – расстояние от центра квадрокоптера до роторов.

Линейное движение квадрокоптера описывается уравнением второго закона Ньютона:

$$m\ddot{r} = mg + F_b, \quad (7)$$

где m – масса квадрокоптера, g – гравитационное ускорение, направленное вниз, F_b – результирующая сила в системе координат тела.

Сила F_b создается четырьмя роторами и направлена по оси z системы координат квадрокоптера. Общая подъемная сила:

$$F_b = [0, 0, \sum F_i] = [0, 0, T], \quad (8)$$

где T – общая подъемная сила, создаваемая роторами.

Линейное движение в инерциальной системе можно переписать как:

$$m\ddot{r} = mg + RF_b, \quad (9)$$

где R – матрица вращения, описывающая ориентацию квадрокоптера в пространстве.

Угловое движение квадрокоптера описывается уравнением Эйлера для вращательного движения:

$$I\dot{\omega} = M_b - \omega \times (I\omega), \quad (10)$$

где I – матрица инерции квадрокоптера, $M_b = [M_b, M_b, M_b]^T$ – момент сил в системе координат квадрокоптера, создаваемый роторами.

Кинематика и ориентация. Связь между угловыми скоростями $\omega = [p, q, r]^T$ и углами Эйлера ϕ, θ, ψ описывается следующим уравнением:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)/\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (11)$$

На рис. 7 представлено схематичное представление манипулятора, состоящего из двух звеньев,

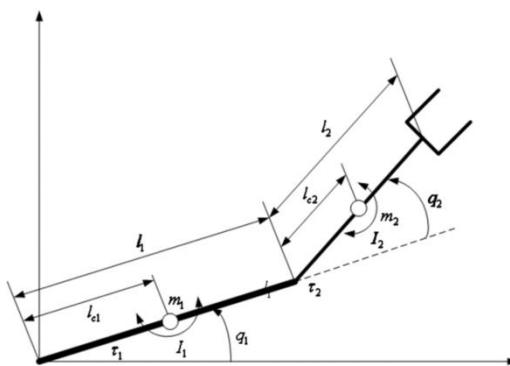


Рис. 7. Система координат и углы ориентации двухзвенного манипулятора

Основная проблема управления манипуляторами на БПЛА заключается в том, что при движении манипулятора происходит перемещение центра масс как самого манипулятора, так и БПЛА, для чего необходимо своевременно реагировать регулятору управляющему БПЛА. Управление в такой системе должно происходить совместно, чтобы БПЛА мог двигаться, подстраивая свои движения под движения манипулятора.

III. Существующие методы и подходы

A. Общий обзор управления манипуляторами на БПЛА

Использование БПЛА в сочетании с роботизированными манипуляторами становится все более популярным направлением в области робототехники и автоматизации. Это связано с необходимостью выполнения сложных задач, таких как захват и транспортировка объектов, манипуляции в труднодоступных местах, а также выполнение

ние сборочных операций на высоте. Одним из ключевых аспектов при разработке таких систем является обеспечение стабильного и точного управления, которое должно учитывать динамические взаимодействия между БПЛА и манипулятором.

Системы управления манипуляторами на БПЛА должны справляться с рядом сложных задач. К ним относятся компенсация возмущений, вызванных движением манипулятора, поддержание устойчивости летательного аппарата, а также управление взаимодействием манипулятора с окружающей средой. Эти задачи требуют применения продвинутых методов управления, которые должны быть достаточно быстрыми и точными для работы в реальном времени.

Существуют различные подходы к решению этой проблемы, включая классические методы управления на основе обратной динамики, синергетические методы, методы адаптивного и робастного управления, а также гибридные подходы, сочетающие несколько методов для достижения более высокой эффективности. В исследованиях рассматриваются методы адаптивного управления, которые позволяют системе подстраиваться под изменяющиеся внешние условия и параметры системы.

B. Описание методов, рассматриваемых в статье

В данной статье были рассмотрены три ключевых подхода к управлению манипуляторами, установленными на квадрокоптерах:

- **Синергетическое управление с конечным временем**, предложенное в статье [8] представляет собой метод, основанный на концепции управления за конечное время. Этот метод использует принципы синергетики для стабилизации системы в заранее определенный момент времени, что делает его особенно полезным для приложений, требующих быстрого отклика.
- **Управление на основе модели Лагранжа**, описанное в статье [9], ориентировано на управление многозвездными манипуляторами. Метод основывается на уравнениях Лагранжа, что позволяет учитывать сложные динамические взаимодействия между БПЛА и манипулятором, обеспечивая высокую точность управления.
- **Гибридное адаптивное управление**, представляемое в статье [10], объединяет адаптивные методы управления с классическими подходами. Этот гибридный метод обеспечивает высокую устойчивость и адаптивность системы к изменяющимся внешним условиям и параметрам манипулятора, что делает его особенно полезным в условиях неопределенности.

C. Метод 1: Синергетическое управление с конечным временем

Синергетическое управление представляет собой метод, который основывается на теории синергетики — междисциплинарной области, изучающей самоорганизующиеся системы. Основная идея этого подхода заключается в управлении системой таким образом, чтобы она достигла желаемого состояния за конечное время, несмотря на возможные возмущения и неопределенности.

В контексте управления манипуляторами, установленными на квадрокоптере, синергетическое управление предполагает создание специальной функции управления, которая генерирует управляющие воздействия таким образом, чтобы система стабилизировалась в определённой точке фазового пространства за конечное время. Этот метод особенно эффективен в условиях, когда требуется быстрое реагирование на изменения внешней среды или динамики объекта управления.

Математическая модель синергетического управления включает несколько ключевых элементов. Пусть динамика системы описывается уравнением:

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad (12)$$

где x – вектор состояния системы, u – вектор управления, f – нелинейная функция, описывающая динамику системы.

В рамках синергетического подхода вводится специальная функция $\sigma(x, t)$, называемая синергетической поверхностью, которая определяется как:

$$\sigma(x, t) = g(x) - h(t), \quad (13)$$

где $g(x)$ – функция состояния, а $h(t)$ – временная зависимость, которая стремится к нулю за конечное время t .

Цель управления заключается в том, чтобы привести систему к состоянию, при котором $\sigma(x, t) = 0$ за время T . Для этого используется функция управления следующего вида:

$$u(t) = -k \frac{\partial \sigma}{\partial x}(x, t), \quad (14)$$

где k – коэффициент усиления. Такой подход позволяет стабилизировать систему в заданное время T , обеспечивая её устойчивость к внешним возмущениям.

Синергетическое управление с конечным временем обладает рядом преимуществ. Прежде всего, этот метод обеспечивает высокую скорость реакции системы и позволяет достичь стабильного состояния за заранее определённый промежуток времени. Это особенно важно для задач, связанных с воздушной робототехникой, где требуются быстрые и точные действия.

Однако у метода есть и недостатки. В частности, синергетическое управление может быть чувствительно к неточностям в модели системы, а также требует достаточно сложных вычислительных ресурсов для реализации в реальном времени. Тем не менее, его использование в приложениях, требующих быстрого реагирования, представляется весьма перспективным.

D. Метод 2: Управление на основе модели Лагранжа

Механика Лагранжа – это метод описания динамики механических систем, основанный на принципе наименьшего действия. Он широко используется в робототехнике для моделирования и управления системами с несколькими степенями свободы, включая манипуляторы на БПЛА.

Основное уравнение Лагранжа второго рода для механической системы можно записать в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q, \quad (15)$$

где L – лагранжиан системы, q – обобщённые координаты, \dot{q} – обобщённые скорости, Q – обобщённые силы.

Метод управления на основе модели Лагранжа обладает высокой точностью и позволяет учитывать все важные динамические особенности системы. Это делает его незаменимым в задачах, требующих прецизионного управления, таких как сборка объектов или выполнение точных манипуляций на высоте.

Однако, использование этого метода связано с определёнными трудностями. Прежде всего, это высокая вычислительная сложность, которая требует значительных ресурсов, особенно при управлении многозвездными манипуляторами. Кроме того, метод чувствителен к погрешностям в модели системы, что может привести к ухудшению качества управления в реальных условиях.

E. Метод 3: Гибридное адаптивное управление

Адаптивное управление является методом, который позволяет системе изменять свои параметры в реальном времени для поддержания оптимальной работы в условиях неопределенности или изменения внешних воздействий. В сочетании с гибридными подходами, включающими элементы классического управления, адаптивное управление позволяет эффективно справляться с задачами, требующими высокой устойчивости и адаптивности.

Адаптивные методы особенно полезны в задачах управления манипуляторами на БПЛА, где возможно изменение параметров системы в процессе выполнения задач (например, изменение веса манипулируемого объекта или непредсказуемые внешние возмущения).

Гибридное адаптивное управление комбинирует элементы классического управления, например, на основе уравнений Лагранжа, с адаптивными механизмами, которые корректируют параметры управления в реальном времени.

Рассмотрим основное уравнение адаптивного управления:

$$u(t) = \theta(t)^\top \phi(x(t)), \quad (16)$$

где $u(t)$ – вектор управления, $\theta(t)^\top$ – вектор адаптивных параметров, $\phi(x(t))$ – базисные функции, зависящие от состояния системы $x(t)$.

Параметры $\theta(t)^\top$ обновляются по следующему закону адаптации:

$$\theta'(t) = \gamma \phi(x(t)) e(t), \quad (17)$$

где $e(t)$ – ошибка управления, а γ – скорость адаптации.

Такой подход позволяет системе "обучаться" в процессе работы, улучшая точность и устойчивость управления по мере накопления данных.

Гибридное адаптивное управление обладает рядом преимуществ, включая высокую устойчивость и возможность адаптации к изменяющимся условиям работы. Это делает его особенно полезным в задачах, где параметры системы могут меняться в процессе выполнения операций.

Однако адаптивные методы также имеют свои ограничения. Они могут быть более сложными для реализации, требовать значительных вычислительных ресурсов и тщательной настройки параметров адаптации для обеспечения стабильности системы. Несмотря на это, гибридное адаптивное управление представляет собой перспективный подход для управления манипуляторами на БПЛА в условиях неопределенности и изменяющихся внешних воздействий.

IV. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ

В данном разделе проводится сравнительный анализ трёх рассмотренных методов управления манипуляторами, установленными на квадрокоптере: синергетического управления с конечным временем, управления на основе модели Лагранжа и гибридного адаптивного управления. Для каждого метода оцениваются ключевые параметры, такие как точность управления, скорость реакции, устойчивость к внешним возмущениям, вычислительная сложность и адаптивность.

A. Точность управления

Управление на основе модели Лагранжа предоставляет наиболее высокую точность управления, так как этот метод позволяет учитывать все важные динамические особенности системы. Модель Лагранжа обеспечивает детальное описание взаимодействий между квадрокоптером и манипулятором, что позволяет добиваться высокоточных манипуляций, особенно в задачах, требующих прецизионного управления.

Синергетическое управление также обеспечивает высокую точность, особенно в условиях, где требуется быстрое достижение стабильного состояния. Однако точность этого метода может снижаться при наличии значительных внешних возмущений или неточностей в модели системы.

Гибридное адаптивное управление предлагает компромисс между точностью и адаптивностью. Оно способно подстраивать параметры управления в реальном времени, что позволяет поддерживать высокую точность даже в условиях изменения внешних факторов. Однако точность этого метода зависит от качества начальной настройки и эффективности адаптивного алгоритма.

B. Скорость реакции

Синергетическое управление с конечным временем отличается высокой скоростью реакции, так как этот метод изначально разработан для достижения желаемого состояния за фиксированный промежуток времени. Это делает его особенно эффективным в сценариях, где требуется быстрое реагирование на изменения в динамике системы.

Метод Лагранжа, хотя и обеспечивает высокую точность, может быть менее эффективным с точки зрения скорости реакции из-за необходимости решения сложных уравнений в реальном времени. Это может ограничивать его применение в задачах, требующих мгновенного отклика.

Гибридное адаптивное управление может обеспечить хорошую скорость реакции за счёт гибридизации классических методов с адаптивными алгоритмами. Однако скорость реакции будет зависеть от скорости адаптации системы и сложности базисных функций.

C. Устойчивость к внешним возмущениям

Гибридное адаптивное управление обеспечивает наибольшую устойчивость к внешним возмущениям за счёт возможности корректировки параметров управления в реальном времени. Это позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям работы, поддерживая стабильное функционирование даже в сложных внешних условиях.

Синергетическое управление, хотя и обеспечивает высокую скорость и точность, может быть менее устойчивым в условиях значительных возмущений, особенно если модель системы содержит неточности.

Метод Лагранжа также демонстрирует хорошую устойчивость, но в меньшей степени, чем гибридное адаптивное управление, так как его эффективность зависит от точности модели системы.

D. Вычислительная сложность

Метод Лагранжа обладает самой высокой вычислительной сложностью среди рассмотренных методов. Это связано с необходимостью решения уравнений, описывающих динамику многозвездной системы, что требует значительных вычислительных ресурсов, особенно при использовании в реальном времени.

Синергетическое управление имеет средний уровень вычислительной сложности, так как требует расчета синергетической функции и управления на её основе. Однако этот метод может быть эффективнее с точки зрения вычислительных затрат по сравнению с методом Лагранжа, особенно в задачах с фиксированным временем реагирования.

Гибридное адаптивное управление также требует значительных вычислительных ресурсов, особенно для выполнения адаптивных алгоритмов в реальном времени. Тем не менее, этот метод может быть оптимизирован путём упрощения базисных функций и ускорения процесса адаптации.

E. Адаптивность

Гибридное адаптивное управление явно превосходит другие методы по параметру адаптивности. Этот метод специально разработан для работы в условиях изменяющихся внешних воздействий и неопределённостей, что делает его особенно подходящим для задач, требующих гибкости и устойчивости системы в изменяющихся условиях.

Методы Лагранжа и синергетического управления, хотя и могут обеспечивать высокую точность и скорость реакции, менее адаптивны. Они требуют точной настройки и могут плохо справляться с изменяющимися параметрами системы без дополнительных корректировок.

F. Итог сравнения

В результате проведённого сравнительного анализа можно сделать следующие выводы. Метод Лагранжа является наиболее подходящим для задач, где требуется высокая точность управления и точное моделирование динамики системы, однако его высокая вычислительная сложность и меньшая адаптивность ограничивают его применение в сценариях с изменяющимися условиями.

Синергетическое управление с конечным временем представляет собой эффективное решение для задач, требующих быстрого и точного реагирования, но может быть чувствительно к неточностям в модели и внешним возмущениям.

Гибридное адаптивное управление является наиболее универсальным методом, сочетая адаптивность и устойчивость с приемлемым уровнем вычислительной сложности и точности. Это делает его предпочтительным выбором для задач, где параметры системы могут меняться в процессе выполнения операций, а также в условиях неопределенности и изменяющихся внешних воздействий.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был проведён обзор и сравнительный анализ трёх современных методов управления манипуляторами, установленными на квадрокоптерах: синергетического управления с конечным временем, управления на основе модели Лагранжа и гибридного адаптивного управления. Каждый из этих методов имеет свои сильные и слабые стороны, что позволяет использовать их в различных приложениях в зависимости от требований конкретной задачи.

Синергетическое управление с конечным временем показало свою эффективность в задачах, требующих быстрого и точного реагирования. Этот метод обеспечивает достижение желаемого состояния системы за фиксированный промежуток времени, что делает его особенно полезным в условиях, где время отклика критически важно. Однако чувствительность этого метода к неточностям в модели и внешним возмущениям может ограничивать его применение в более сложных и динамически изменяющихся условиях.

Метод управления на основе модели Лагранжа продемонстрировал высокую точность и детализированное моделирование динамики системы. Этот метод особенно полезен в задачах, где требуется точное управление сложными многозвездными манипуляторами. Однако высокая вычислительная сложность и меньшая адаптивность делают его менее предпочтительным в условиях, где система подвергается значительным внешним воздействиям или изменениям параметров.

Гибридное адаптивное управление оказалось наиболее универсальным и устойчивым подходом среди рассмотренных методов. Оно сочетает в себе преимущества классических методов управления с адаптивными алгоритмами, что позволяет эффективно справляться с изменяющимися условиями работы и неопределенностями. Этот метод является предпочтительным выбором для

задач, где система должна адаптироваться к внешним изменениям и поддерживать стабильное функционирование в реальном времени.

Таким образом, выбор оптимального метода управления манипулятором, установленным на квадрокоптере, зависит от конкретных требований задачи. Если основное внимание уделяется точности и прецизионному управлению, метод Лагранжа будет наилучшим выбором. В задачах, где требуется быстрая реакция, предпочтение может быть отдано синергетическому управлению. Однако для большинства приложений, особенно в условиях неопределенности и изменяющихся внешних воздействий, гибридное адаптивное управление представляется наиболее сбалансированным и эффективным решением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fumagalli M., Naldi R., Macchelli A., Carloni R., Stramigioli S. and Marconi L. Modeling and control of a flying robot for contact inspection // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 2012. – P. 3532-3537. – DOI: 10.1109/IROS.2012.6385917.
2. Lee H. and Kim H.J. Estimation, Control, and Planning for Autonomous Aerial Transportation // in IEEE Transactions on Industrial Electronics. – April 2017. – Vol. 64, No. 4. – P. 3369-3379. – DOI: 10.1109/TIE.2016.2598321.
3. Meng X. et al. Design and implementation of rotor aerial manipulator system // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Qingdao, China, 2016. – P. 673-678. – DOI: 10.1109/ROBIO.2016.7866400.
4. Qi J., Kang J. and Lu X. Design and research of UAV autonomous grasping system // 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), Beijing, China, 2017. – P. 126-131. – DOI: 10.1109/ICUS.2017.8278328.
5. Suk-Jun Kim et al. An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat. Sci.Robot. eaar2915(2018). – DOI: 10.1126/scirobotics.aar2915.
6. Seo H., Kim S. and Kim H.J. Aerial grasping of cylindrical object using visual servoing based on stochastic model predictive control // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 2017. – P. 6362-6368. – DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989751.
7. Лазарев В.С., Лашев А.А. Разработка математической модели БПЛА на базе квадрокоптера с рамой DJI F-450 // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2 (49). – С. 110.
8. Chi-Hua Liu, Ming-Ying Hsiao. A finite time synergetic control scheme for robot manipulators // Computers & Mathematics with Applications. – 2012. – Vol. 64, Issue 5. – P. 1163-1169. – ISSN 0898-1221. – doi.org/10.1016/j.camwa.2012.03.058.
9. Jimenez-Cano A.E., Martin J., Heredia G., Ollero A. and Cano R. Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks // 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, 2013. – P. 4916-4921. – DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631279.
10. Orsag M., Korpela C.M., Bogdan S. et al. Hybrid Adaptive Control for Aerial Manipulation // J Intell Robot Syst. – 2014. – 73. – P. 693-707. – doi.org/10.1007/s10846-013-9936-1

Результаты компьютерного моделирования продольного движения самолета с использованием модели плоской земли в стартовой системе координат

Белоусова Ольга Васильевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
obelousova@sfedu.ru

Белоусов Юрий Борисович
Отделение «ОКБ Сухого» в г. Таганроге
ПАО «Объединенная авиастроительная
корпорация»
Таганрог, Россия
ibelo@sfedu.ru

Гривцов Владимир Владиславович
Институт радиотехнических
систем управления
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
gvv@sfedu.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача моделирования продольного движения самолета с использованием модели плоской земли в стартовой системе координат. Производятся физически обоснованные допущения и упрощения модели. Представлены результаты компьютерного моделирования продольного движения самолета в различных физических условиях.

Abstract. The paper considers the problem of modeling the longitudinal motion of an aircraft using a flat earth model in the starting coordinate system. Physically justified assumptions and simplifications of the model are made.

Ключевые слова: математическое моделирование, продольное движение, угол атаки, самолет, центр масс.

Keywords: mathematical modeling, longitudinal motion, angle of attack, aircraft, center of mass.

I. ВВЕДЕНИЕ

Математическое и компьютерное моделирование в настоящее время играет очень важную роль в авиастроении. Современные самолеты представляют собой сложные динамические системы. Они состоят из множества специализированных подсистем, узлов и агрегатов и способны выдерживать нагрузки в различных режимах и условиях. Поэтому их проектирование невозможно без математического моделирования. Одним из основных объектов моделирования в авиастроении является математическая модель, имитирующая движение воздушного судна в атмосфере Земли. Она позволяет моделировать и тестируировать бортовое оборудование воздушного судна в условиях, максимально приближенных к реальным.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим продольные движения. Они совершаются в продольной вертикальной плоскости по углу атаки α , углу тангажа ϑ , углу наклона траектории θ и высоте H . Положение самолета относительно поверхности Земли представлено на рис. 1.

При движении в земной атмосфере на самолет действуют следующие силы:

- аэродинамическая сила F^{aero} ,
- сила тяги двигателей P , которая отклоняется от продольной оси самолета на угол установки двигателей ϕ_P ,
- сила гравитационного поля mg_g .

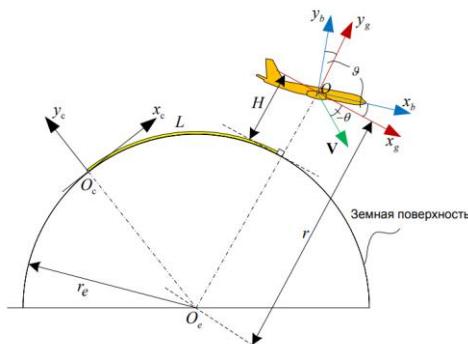


Рис. 1. Положение самолета относительно Земли: $O_c x_c y_c$ – земная стартовая система координат, $Ox_b y_b$ – связанная система координат, $Ox_g y_g$ – географическая система координат

Действие этих сил представлено на рис. 2

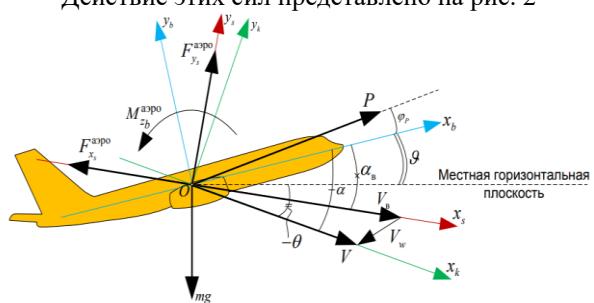


Рис. 2. Компоненты векторов сил, моментов и скоростей: V – земная скорость, V_B – скорость воздуха, V_W – скорость ветра

Уравнение движения центра масс самолета согласно второму закону Ньютона можно представить в виде [1]:

$$m \frac{d}{dt} V_a = P + F^{apo} + mg_r, \quad (1)$$

где V_a – абсолютная скорость центра масс самолета, m – масса самолета.

Уравнение (1) описывает абсолютное движение центра масс самолета, т.е. его перемещение в абсолютном пространстве относительно некоторой инерциальной системы отсчета.

Так как нас интересует движение самолета в атмосфере Земли, его необходимо рассматривать по отношению к другой системе отсчета, которая фиксирована относительно земной поверхности. Такую систему называем земной (ЗСК) и представляем на рис. 1 как $O_c x_c y_c$. Начало ЗСК помещают на поверхности Земли в некоторой точке O_c , которая может быть закреплена с взлетно-посадочной полосой (ВПП), радиомаяками или промежуточными пунктами маршрута полета. Скорость самолета относительно данной системы называется земной скоростью и обозначается через V .

Между абсолютной и земной скоростями самолета существует алгебраическая связь в виде выражения:

$$V_a = V_e + \omega_e \times r, \quad (2)$$

где V_e – скорость перемещения Земли в абсолютном пространстве, этой величиной пренебрегаем в связи с малостью высоты полета относительно диаметра Земли, ω_e – угловая скорость суточного вращения Земли, r – радиус-вектор от центра масс самолета до центра Земли.

Т.к. высота полета летательных аппаратов типа самолета не велика по сравнению с размером Земли и ее атмосферы, при изучении динамики полета самолета поступательным движением Земли в пространстве можно пренебречь, т.е. V_e принята равной нулю. С учетом этого, любая система координат, закрепленная с центром масс Земли и не участвующая в ее суточном вращении, считается инерциальной. Таким образом, производная вектора r есть абсолютная скорость самолета:

$$\frac{dr}{dt} = V_e + \omega_e \times r. \quad (3)$$

Для описания движения самолета в атмосфере Земли необходимо решить уравнение (1) относительно V :

$$\begin{aligned} m \frac{d}{dt} (V + \omega_e \times r) &= P + F^{apo} + mg_r \\ m \frac{d}{dt} V &= P + F^{apo} + mg_r - m \frac{d}{dt} (\omega_e \times r). \end{aligned} \quad (4)$$

В этом новом уравнении все дифференцирования должны быть взяты в инерциальной системе, поэтому:

$$\begin{aligned} m \frac{d}{dt} (\omega_e \times r) &= \left(\frac{d}{dt} \omega_e \right) \times r + \omega_e \times \frac{d}{dt} r = 0 + \omega_e \times (V + \omega_e \times r) = \\ &= \omega_e \times V + \omega_e \times (\omega_e \times r) \end{aligned} \quad (5)$$

здесь первое слагаемое дифференциала равно нулю, т.к. в инерциальной системе угловая скорость вращения Земли не меняется со временем.

С учетом (5), уравнение движения центра масс самолета относительно Земли имеет вид:

$$m \frac{d}{dt} V = P + F^{apo} + mg_r - m \omega_e \times V - m \omega_e \times (\omega_e \times r). \quad (6)$$

Система Oxy называется проекционной системой и вращается со скоростью ω относительно поверхности Земли [2]. В отличие от системы отсчета $O_c x_c y_c$, в которой движение самолета описывается как движение относительно начала системы O_c , в системе Oxy движение самолета рассматривается как движение (относительно какой-либо точки) в проекциях на ее оси (т.е. Ox и Oy). Проекции вектора производной от земной скорости самолета на оси системы Oxy вычисляются по формуле Пуассона [1]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{d}{dt} V \right)_x &= \frac{d}{dt} V_x + ((\omega_e + \omega) \times V)_x \\ \left(\frac{d}{dt} V \right)_y &= \frac{d}{dt} V_y + ((\omega_e + \omega) \times V)_y. \end{aligned} \quad (10)$$

где V_x , V_y – проекции вектора земной скорости на оси Ox и Oy .

Учитывая (9) и (10), имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_x &= \frac{P_x + F_x^{apo}}{m} + g_x - (\omega \times V)_x - (2\omega_e \times V)_x \\ \frac{d}{dt} V_y &= \frac{P_y + F_y^{apo}}{m} + g_y - (\omega \times V)_y - (2\omega_e \times V)_y. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $\omega \times V = a_\Pi$ является переносным ускорением и появляется в результате вращения проекционной системы относительно системы отсчета.

III. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ САМОЛЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ПЛОСКОЙ ЗЕМЛИ

В случае плоской Земли ось $O_c x_c$ совпадает с земной поверхностью, поэтому система отсчета ЗСК может быть использована для решения уравнений по координатам и ориентации самолета. В данном случае, дальность и высоту полета можно определить как координаты по осям $O_c x_c$ и $O_c y_c$, соответственно. Кроме этого, ориентацию самолета и направление его траектории совершено можно определить по отношению к оси $O_c x_c$ (рис. 3).

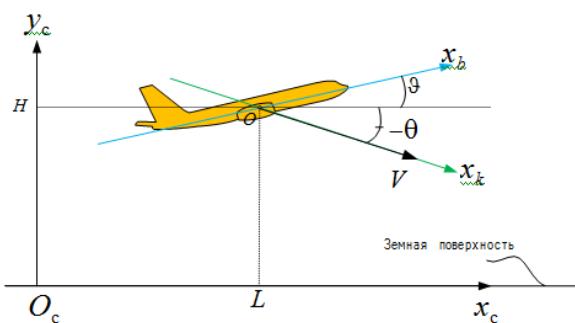


Рис. 3. Положение самолета на земле (плоская модель земли)

Для получения уравнений движения центра масс самолета относительно земли необходимо проецировать векторное уравнение (1) на оси некоторой выбранной системы координат Oxy . В случае плоской Земли, в качестве проекционной системы координат Oxy можно использовать различные системы, такие как ЗСК (земная система координат), ТСК (траекторная система координат) или ССК (связанная система координат). Выбор одной из нескольких систем координат осуществляется в зависимости от цели моделирования движения самолета. Например, для изучения траектории полета самолета выбирают ТСК, а для исследования устойчивости движения самолета относительно центра масс предпочтено использовать ССК, в то время для цели моделирования навигационных систем, таких как беспилотная инерциальная навигационная система, удобнее использовать ССК либо ЗСК.

IV. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При разработке комплекса моделирования полета рассматривались только некоторые виды установившегося движения самолета: **прямолинейное равномерное** движение в режиме горизонтального полета и снижения по глиссаде. Моделирование движения самолета в таких режимах полета значительно облегчает проверять работу программного обеспечения и, следовательно, адекватность разработанной математической модели движения самолета.

При отсутствии возмущающих воздействий со стороны окружающей среды и изменения параметров самолета, установившийся режим полета без алгоритма стабилизации движения можно обеспечивать лишь только при строго определенных начальных значениях параметров состояния и управления. При этом значение некоторых из них должно быть задано в соответствии с режимом полета. Например, для горизонтального полета обязательно задавать высоту полета, а для режима равномерного движения требуется задавать величину скорости. Эти заданные параметры вместе с собой однозначно характеризуют режим движения самолета и поэтому их называют **характерными параметрами** полета. Значение остальных параметров не может быть определено без проведения расчетов с учетом особенностей заданного режима движения. К примеру, для обеспечения состояния равновесия, положение сектора газа должно определяться в зависимости от веса самолета и аэродинамических сил, которые, в свою очередь, зависят от

скорости, высоты и углов ориентации самолета. Такие параметры не характеризуют режим движения самолета и их называют **нехарактерными параметрами** полета. Задачу определения значения нехарактерных параметров называют **задачей балансировки** самолета и ее можно решить путем подбора их для удовлетворения требованиям, соответствующим заданным режимам полета.

Для построения компьютерной модели разработан комплекс компьютерных программ, включающий следующие модули: вычислитель нелинейных систем уравнения, хранения полученных решений в структурированном виде (база данных), визуализации полученных данных, проверки корректности полученных результатов, интеллектуальный модуль анализа полученных результатов.

Разработанный программный комплекс может применяться для пространственно-временного моделирования продольного движения самолета при различных Физических параметрах самого самолета и окружающей среды. Использование объектно-ориентированного подхода позволило создать программу, позволяющую проводить моделирование в различных физических условиях. При этом программный комплекс имеет очень высокий уровень абстракции, и замены одних модулей другими или доработка существующих не повлияют на работу других части программы.

В результате работы программы пользователь получает различные физические характеристики продольного движения самолета в различных физических и метеорологических условиях в различные временные промежутки и на различном удалении от поверхности земли.

Разработка программного комплекса проводилась при помощи пакета Microsoft Visual Basic.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Выходными данными программного компонента электронная таблица с рассчитанными данными (*.xls) и временные диаграммы рассчитываемых параметров модели (рис. 4-7).

Параметры моделирования среды							
Не учитывать наличие ветра		Тип двигателя по сектору газа					
ГСК - географическая система координат		Плоская модель Земли					
Параметры моделирования самолета							
Обозначение	Значение	Ед.изм	Наименование параметра				
Параметры самолета							
- engine	4	шт	Количество работающих двигателей				
m massa	162	т	Масса самолета				
phi_p fip	4	град	Угол установки двигателей				
S S	327	кв.м	Площадь проекции крыла				
b bA	7,57	м	Средняя аэродинамическая хорда крыла (САХ)				
I_z IZ	23000000	кг. м ²	Момент инерции				
Параметры полетного задания							
Hзад HTR	2228	м	Высота				
Vзад VTR	94	м/сек	Земная скорость				
a_zad DVTR	58	м/сек ²	Ускорение				
theta_zad THETATR	11	град	Угол наклона траектории				
omega_zad WTR	28	м/сек	Угловая скорость				
phi_zad FTR	19	град	Угол наклона плоскости самолета				
Параметры конфигурации							
x_T xT	29	%	Центровка (САХ)				
phi_cm fist	-5,34	град	Угол установки стабилизатора				

Рис. 4. Элемент рабочего окна программного модуля

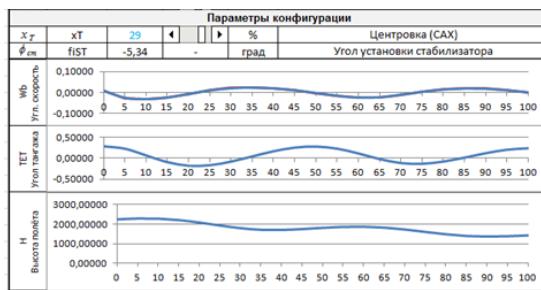


Рис. 5. Элемент рабочего окна программного модуля

TIME	VXg	VYg	WB	TET	H	L
0	90,74524	14,31413	0,00841	0,27504	2244,01564	91,51671
5	83,51454	4,58668	-0,02664	0,22043	2290,90870	525,75094
10	81,46887	-7,99798	-0,03356	0,06325	2283,19773	935,76606
15	85,10822	-20,51113	-0,02547	-0,09068	2211,18619	1349,96423
20	93,50123	-29,33479	-0,00673	-0,17287	2084,16215	1794,82772
25	104,50621	-30,54171	0,01077	-0,16042	1930,70746	2289,45732
30	114,11631	-22,79354	0,02172	-0,07597	1793,93876	2837,60270
35	117,91891	-9,12198	0,02512	0,04436	1712,83905	3420,77580
40	114,20531	4,37729	0,02128	0,16319	1702,39063	4004,01947
45	105,19378	12,20502	0,01139	0,24686	1746,93864	4553,88786
50	95,05101	12,31838	-0,00245	0,27014	1811,37961	5054,12547
55	87,27350	6,03184	-0,01676	0,22120	1859,36953	5508,43837
60	83,76566	-3,82424	-0,02592	0,11090	1865,75551	5934,04744
65	85,11920	-14,40140	-0,02400	-0,01917	1819,92858	6354,25775
70	90,83799	-22,82918	-0,01131	-0,11046	1725,28542	6792,57181
75	99,33543	-25,91214	0,00404	-0,12784	1600,62881	7267,35144
80	107,68566	-21,84037	0,01543	-0,07668	1478,29042	7785,73240
85	112,29795	-12,02578	0,02055	0,01613	1391,97880	8337,89194
90	111,05081	-0,78171	0,01914	0,11797	1360,44325	8898,76161
95	104,79302	7,11288	0,01200	0,19782	1378,44076	9439,91981
100	96,53617	9,03441	0,00092	0,23117	1421,44019	9943,36067

Рис. 6. Элемент рабочего окна программного модуля

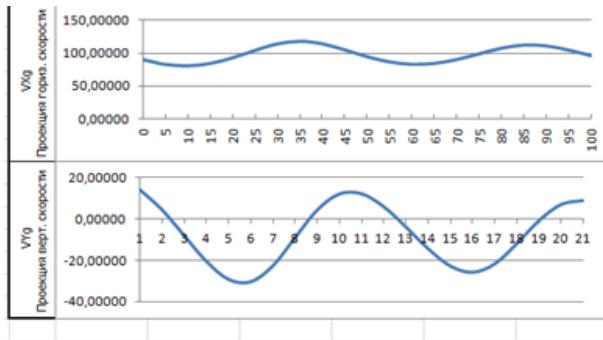


Рис. 7. Элемент рабочего окна программного модуля

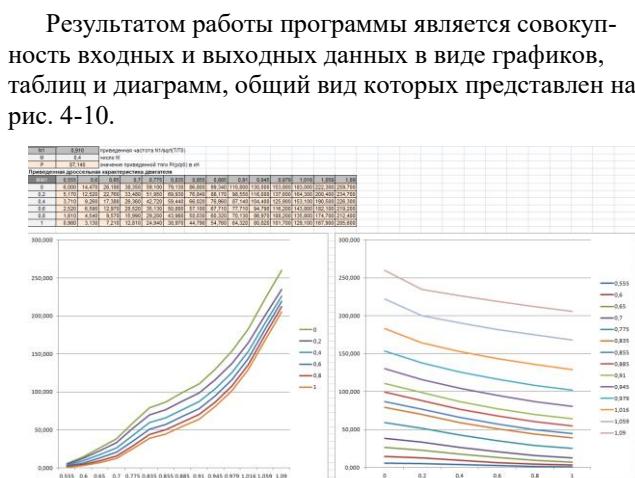


Рис. 8. Данные моделирования приведенной дроссельной характеристики одного двигателя самолета

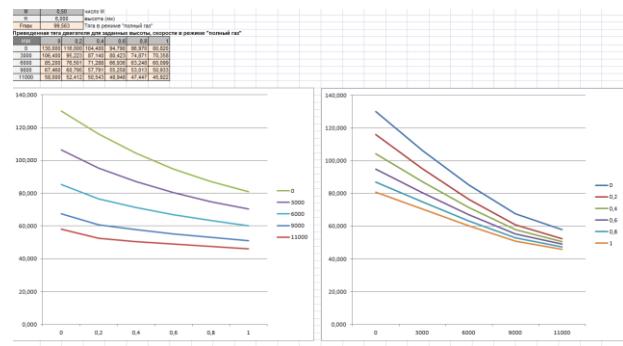


Рис. 9. Данные моделирования приведенной тяги двигателя в режиме «полный газ»

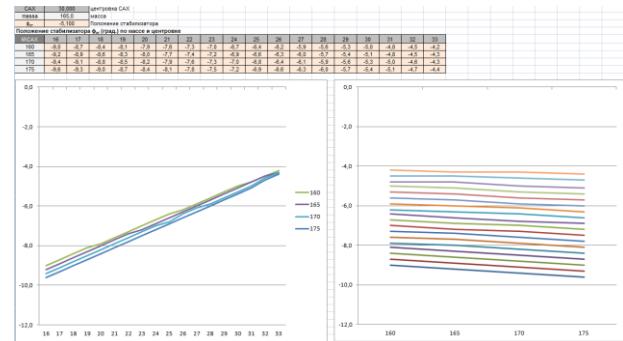


Рис. 10. Данные моделирования положения стабилизатора по массе и центровке

Выходные файлы содержат как результаты моделирования в виде рядов данных искомых физических величин, так и все параметры, которые использовались при модельных расчётах. В дальнейшем этот файл удобно использовать как для анализа результатов компьютерного моделирования, так и для соотнесения полученных результатов с экспериментальными данными.

Решения выводятся в числовом и графическом виде. Для визуализации применялись стандартные модули Microsoft Office.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время происходит доработка программного комплекса для моделирования прямолинейного движения самолёта в других системах координат и сравнение полученных результатов.

Анализируя полученные результаты можно представить поведение самолёта при различных условиях, что позволяет моделировать и тестиировать бортовое оборудование самолёта в условиях, максимально близких к реальным условиям их функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1969. – 501 с.
2. Bryson A.E. Control of spacecraft and aircraft. – Princeton University Press, 1994.
3. Mair W.A., Birdsall D.L. Aircraft Performance. Cambridge aerospace series.
4. Daidzic N.E. Estimation of performance airspeeds for High-Bypass turbofan equipped transport-category airplanes.
5. Белоусов Ю.Б., Белоусова О.В. Задача моделирования продольного движения самолёта // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, Таганрог, 10–15 апреля 2023 года. – Таганрог: ЮФУ, 2023. – С. 294–296.

Повышение качества навигации БПЛА с использованием оптического потока

Вахрушев Дмитрий Евгеньевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vakhrushev@sedu.ru

Веселов Геннадий Евгеньевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
gev@sedu.ru

Аннотация. В работе исследуется использование оптического потока для улучшения навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях отсутствия сигналов GNSS (внутри помещений или в городской застройке). Описаны теоретические основы и компоненты разработанного прототипа. Первые тесты выявили проблемы, предложены решения, включая компенсацию задержки через кросскорреляцию для синхронизации датчиков. Второе тестирование подтвердило улучшение точности и снижение шума.

Abstract. The study investigates the use of optical flow to enhance UAV navigation in environments where GNSS signals are unavailable, such as indoors or in urban areas. The theoretical foundations and components of the developed prototype are described. Initial tests revealed issues, and solutions were proposed, including delay compensation through cross-correlation for sensor synchronization. The second round of testing confirmed improved accuracy and noise reduction.

Ключевые слова: оптический поток, навигация, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), спутниковая навигационная система (GNSS), навигация внутри зданий, синхронизация датчиков, компенсация задержки, взаимно-корреляционная функция.

Keyword: optical flow, navigation, unmanned aerial vehicles (UAVs), global navigation satellite system (GNSS), indoor navigation, sensor synchronization, delay compensation, cross-correlation function.

I. ВВЕДЕНИЕ

В мире современных технологий навигация становится ключевым аспектом в различных областях робототехники и автономных транспортных средств. Применение оптического потока в системах навигации автономных подвижных объектов является одним из наиболее перспективных и эффективных инструментов в современных системах. Важным преимуществом систем навигации, основанных на применении оптического потока, является их способность работать как внутри зданий и местах с плотной городской застройкой так и в местах, где GNSS (спутниковая система навигации) недоступна. Это делает его эффективным инструментом для применения в системах навигации в условиях ограниченной доступности спутниковых сигналов. Следует отметить, что оптический поток отличается высокой частотой работы и способностью отслеживать малые, но быстрые

перемещения, что позволяет повысить точность навигации, скорость реакции и улучшить динамические характеристики в различных приложениях [3]. При совместном использовании оптического потока с GNSS появляется возможность фиксировать атаки, осуществляемые подменой сигнала навигационных систем или их гашения. Таким образом, комбинированная система существенно повышает надежность навигационного решения. При потере или искажении сигналов глобальных навигационных систем оптический поток способен компенсировать утрату данных о позиции, обеспечивая непрерывность работы системы навигации. Такой интегрированный подход позволяет создавать более надежные и устойчивые системы навигации, способные эффективно функционировать в различных условиях окружающей среды и минимизировать риски сбоев в работе [2]. Это открывает новые горизонты для применения оптического потока в широком спектре приложений, где требуется высокая степень надежности и точности навигации.

II. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Оптический поток – технология, позволяющая оценить видимое движение, представляющее собой сдвиг точки между двумя изображениями, с помощью которого вычисляется перемещение и скорость перемещения объектов или ключевых точек между двумя кадрами. Для работы оптического потока необходимы два изображения и пиксель с интенсивностью $I(x, y, t)$, где x и y – координаты, t – время фиксации кадра. Предположим, что интенсивность пикселей не меняется, в отличии от смещения пикселя в кадре, то есть интенсивность пикселя в следующем кадре такая же что и его интенсивность в предыдущем кадре

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t).$$

Тогда основной задачей будет определение перемещения пикселя $\Delta D(\Delta x, \Delta y)$. Графическое представление данного процесса представлено на рис 1.

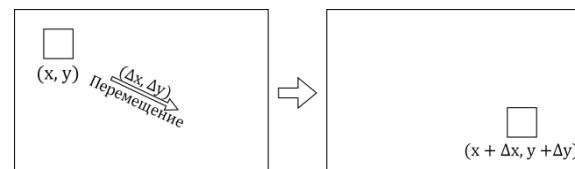


Рис. 1. Принцип работы оптического потока

После определения перемещения $\Delta D(\Delta x, \Delta y)$, измеряемого в пикселях, его необходимо преобразовать в угловое перемещение. Для этого необходимо знать угол обзора FOV и размер матрицы оптического прибора s . На рис. 2 представлена иллюстрация определения коэффициента, с помощью которого осуществляется преобразование величины перемещения, измеряемой в пикселях, в угловое перемещение, измеряемое в радианах.

Таким образом угловое перемещение определяется по следующему выражению:

$$\Delta M = \Delta D \cdot \frac{2 \cdot \tan(FOV/2)}{s}. \quad (1)$$

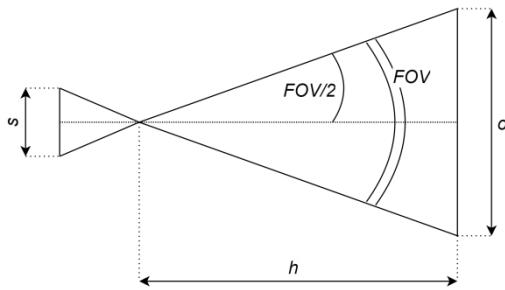


Рис. 2. Матрица сенсора и объект

Если допустить, что известны скорость в декартовой системе координат $v = [x \ y]$, скорость вращения $\omega = [\omega_x \ \omega_y]$ и расстояние до поверхности h , то оптический поток описывается следующими выражениями:

$$\Delta M_x = \left(\frac{v_x}{h} + \omega_x \right) \cdot \Delta t; \quad (2)$$

$$\Delta M_y = \left(\frac{v_y}{h} + \omega_y \right) \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) можно выразить проекции линейной скорости по осям x и y :

$$v_x = \frac{\Delta M_x - \omega_x}{\Delta t} \cdot h; \quad (4)$$

$$v_y = \frac{\Delta M_y - \omega_y}{\Delta t} \cdot h. \quad (5)$$

В работе [3] были получены подобные выражения для оценки скорости движения наземного робота, но при этом не учитывалось вращение объекта, то есть рассматривалось только прямолинейное движение.

С целью исследования комбинированной навигационной системы был разработан прототип модуля оптической навигации для малого БПЛА.

III. СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРОТОТИПА МОДУЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ

Для получения оптического потока в прототипе был использован датчик *PMW3901*, который оснащён матрицей 35×35 пикселей с частотой работы 121 кадр в секунду, линзой с углом обзора 42° . Для получения расстояния до поверхности использован Time-of-Flight дальномер *VL53L0X*, с максимальной высотой работы 2 м и точностью $\pm 3\%$. Для измерения угловых скоростей использован

гироскоп *MPU-6050*, с максимальной измеряемой скоростью вращения 2000 $^\circ/\text{s}$. Для обработки данных был выбран микроконтроллер *STM32G030*. Блок-схема устройства представлена на рис 3.

Схожее по принципу работы, но отличающееся по реализации устройство было предложено в данной статье [4].

Разработанный прототип подключается к пилотному контроллеру с помощью разъема, который используется как для подключения питания к прототипу (контакты *5V* и *GND*), так и для обмена информацией по протоколу *MAVLINK* (контакты *TX*, *RX*).

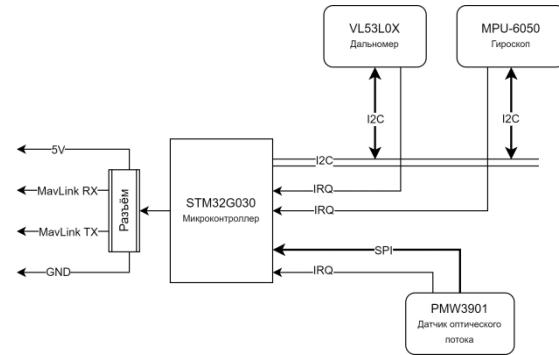


Рис. 3. Блок-схема устройства

Гироскоп настроен на частоту работы $f_g = 100$ Гц с генерацией прерывания. В точке покоя БПЛА записывается информация о нулевом смещении ω_0 . При каждом последующем прерывании от гироскопа происходит считывание угловой скорости ω , и с учетом компенсации нулевого смещения ω_0 вычисляется накопление угла вращения ϕ :

$$\phi_t = \phi_{t-1} + (\omega - \omega_0) \cdot \Delta t_g, \quad (6)$$

где Δt_g — время между считываниями, $\Delta t_g = 1/f_g$.

Дальномер настроен на максимальную возможное расстояние с генерацией прерывания. При получении данных о расстоянии до поверхности h они сохраняются для дальнейшего использования в памяти контроллера. Также данные дальномера используется для отправки пакета *DISTANCE SENSOR*, который передается полётному контроллеру для определения расстояния до поверхности.

Считывание данных об оптическом потоке происходит с фиксированной частотой $f_o = 20$ Гц. Датчик *PMW3901* накапливает данные о перемещении и очищает аккумулятор при считывании данных. Помимо перемещения ΔD в пикселях, датчик возвращает параметр качества поверхности q , чтобы оценить валидность данных.

На следующем этапе происходит формирование пакета *OPTICAL_FLOW_RAD*:

- фиксированное время интегрирования — $1/f_o = 50$ мс;
- оптический поток за время интегрирования ΔM получается из перемещения ΔD по выражению (1);
- накопленное вращение ϕ (6), после чего аккумулятор очищается;

- добавляется полученная информация о качестве поверхности q , что позволит более точно рассчитать дисперсию скорости и перемещения, вычисленные по этим данным, и улучшить качество фильтрации.

Графическое представление обработки данных представлен на рис. 4.

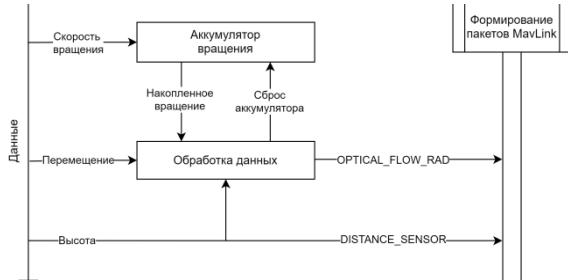


Рис. 4. Процесс обработки данных

После получения данных полётный контроллер выполняет следующие действия [5]:

- находит скорость вращения $\omega = \phi / \Delta t$, где Δt – время интегрирования;
- вычисляет скорость оптического потока $\dot{M} = \Delta M / \Delta t$;
- определяет скорость в связанной системе координат v_b согласно выражениям (4) и (5): $v_b = \dot{M} / h$, где h – расстояние от датчика до поверхности;
- производит поворот вектора скорости из связанной системы координат (*FRD* – система координат, в которой ось X направлена вперёд БПЛА, ось Y направлена вправо, а ось Z направлена вниз) в нормальную земную систему координат (*NED* – система координат, в которой ось X направлена на север, ось Y направлена на восток, а ось Z направлена вниз): $v = v_b \cdot R_E$, где R_E – матрица вращения;
- рассчитывает дисперсию по данным о качестве поверхности, полученной от датчика, а также максимально (σ_w) и минимально (σ_b) возможных значениях дисперсии: $\sigma^2 = (\sigma_b q + \sigma_w (1 - q))^2$, где q – качество поверхности от 0 до 1;
- проверяет, что пакет валиден, то есть что скорость оптического потока не превышает максимально возможное значение;
- применяет полученные данные по скорости v и дисперсии σ для вычисления координат, ускорений и скоростей БПЛА с использованием фильтра Калмана.

IV. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА

При тестировании прототипа была выполнена проверка работы оптического потока и гироскопа в разных сценариях: при линейном перемещении и при вращении. Из графиков, представленных на рис. 5, видно, что при линейном перемещении угловая скорость ω , измеряемая с помощью гироскопа, мала, в то время как скорость оптического потока \dot{M} изменяется в соответствии с движением. При вращательном движении (рис. 6) скорость оптического потока \dot{M} совпадает с угловой скоростью ω .

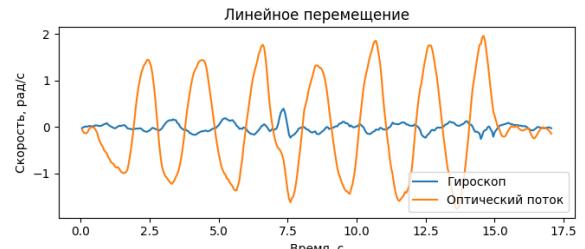


Рис. 5. Работа прототипа при линейном перемещении

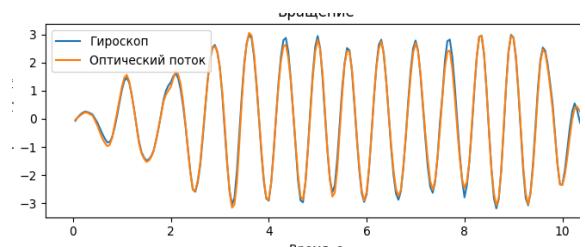


Рис. 6. Работа прототипа при вращении

Из результатов эксперимента можно сделать вывод, что для повышения точности измерения скорости необходимо синхронизировать данные, поступающие от оптического потока и от гироскопа по времени, учитывая все задержки и характеристики применяемых фильтров.

Далее на БПЛА был установлен снизу по направлению к земле прототип разработанного устройства (рис. 7), GPS-приёмник, данные которого были использованы как эталонные для оценки точности позиционирования, а также дальномер, с максимальным измеряемым расстоянием 8 м и точностью ± 6 см. Была выполнена серия полётов БПЛА на высоте от 3 до 9 м, с максимальной скоростью от 5 до 15 м/с.

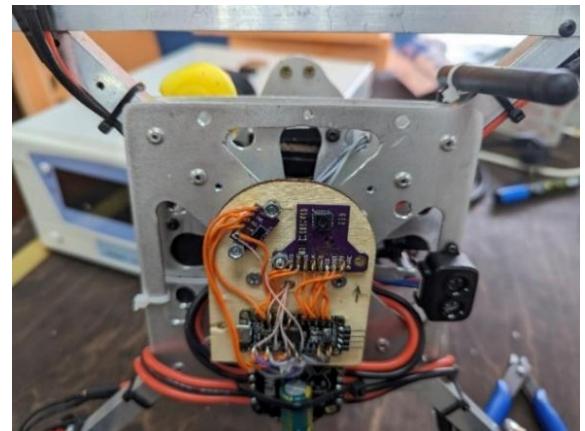


Рис. 7. Прототип в составе БПЛА

Первый полёт был выполнен на высоте 2,5 м. После тестирования было выявлено большое отклонение координат траектории, получаемых от оптического потока и от GPS (рис. 8).

В результате анализа результатов измерения координат траектории полёта были выявлены следующие проблемы. Во-первых, при вычислении скорости БПЛА на основе информации от оптического потока (линия 3 на рис. 9) отклонение от эталонной скорости, вычисляемой с использованием GPS (линия 1 на рис. 9), превышает 20%. Это связано с тем, что был задан некорректный коэффициент преобразования перемещения в пикселях ΔD в перемеще-

ние в радианах ΔM в выражении (1). Для исправления данной ошибки необходима коррекция коэффициента по данным GPS-приёмника. Во-вторых, за счет запаздывания информации, поступающей от оптического потока M , относительно фактического на ≈ 24 мс. Такое значение объясняется принципом работы и внутренним устройством датчика – для работы «идеального» датчика требуется минимум 2 кадра, датчик *PMW3901* обладает задержкой в 3 кадра ($3 * \frac{1}{121\text{Гц}} \approx 21\text{мс}$), в результате чего, в системе наблюдается сильный шум (рис. 9) при вычислении скорости по оптическому потоку (оранжевая линия).

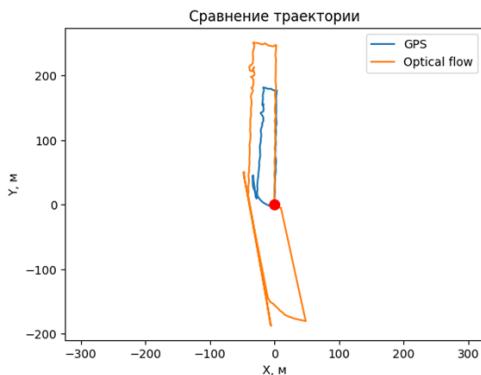


Рис. 8. Траектория полёта на высоте 2,5 м

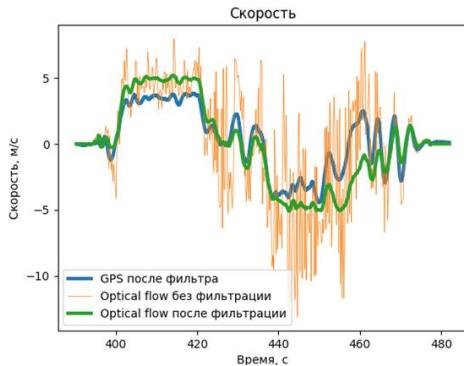


Рис. 9. Показания скорости по оптическому потоку и GPS

Следует отметить, что задержкой обладает и гироскоп, измеряющий угловую скорость ω , которая зависит от конфигурации внутренних фильтров низких частот. Так при наибольшей частоте среза фильтра задержка составляет 0,98 мс (табл.).

ТАБЛИЦА. ЗНАЧЕНИЕ ЗАДЕРЖКИ ГИРОСКОПА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАСТРОЙКИ. ВЫДЕРЖКА ИЗ ДОКУМЕНТАЦИИ НА MPU-6050

DLPF_CFG	Accelerometer ($F_s = 1\text{kHz}$)		Gyroscope		
	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	F_s (kHz)
0	260	0	256	0.98	8
1	184	2.0	188	1.9	1
2	94	3.0	98	2.8	1
3	44	4.9	42	4.8	1
4	21	8.5	20	8.3	1
5	10	13.8	10	13.4	1
6	5	19.0	5	18.6	1
7	RESERVED		RESERVED		8

В результате первого теста было выявлено, что коэффициент из преобразования ΔM в ΔD из формулы (1) влияет на точность и особо критичен при полётах на большие дистанции, а высокая дисперсия не позволяет использовать показания для фильтрации.

V. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЗАИМНОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПОКАЗАНИЙ ЗАДЕРЖКИ

Так как при проведении тестирования системы было выявлено, что задержки в показаниях датчика оптического потока и гироскопа могут привести к значительным ошибкам в оценке скорости и положения аппарата, то для решения этой проблемы предложено использовать взаимнокорреляционную функцию, позволяющую точно определить задержку между сигналами двух датчиков.

Взаимнокорреляционная функция (ВКФ) является мощным инструментом для анализа временной связи между двумя сигналами. Она вычисляется как свёртка одного сигнала с другим, сдвинутым на различное количество отсчётов. Максимальное значение ВКФ указывает на наилучшее совпадение двух сигналов, что позволяет определить временное смещение между ними. (Лекция 22, глава 1 *The Correlation Functions*, пример 3 [6]).

ВКФ двух сигналов $x(t)$ и $y(t)$ определяется следующим образом:

$$(x * y)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m] y[m + n],$$

где n – сдвиг по времени, а m – индекс отсчёта.

В данном исследовании взаимнокорреляционная функция была использована для определения задержки между показанием оптического потока M и угловой скоростью гироскопа ω .

Процедура вычисления задержки включала следующие шаги:

- **сбор данных:** показания датчика оптического потока и гироскопа, полученные из *OPTICAL_FLOW_RAD* в течение 10 секунд при вращательном движении прототипа, записываются в буфер;
- **ресемплирование (пересчёт) сигнала:** для повышения дискретизации выполняется ресемплирование сигнала, что позволит повысить точность определяемой задержки;
- **вычисление взаимнокорреляции:** для записанных сигналов вычислялась полная линейная взаимнокорреляционная функция. Это позволило определить временное смещение, при котором сигналы наилучшим образом совпадают;
- **определение задержки:** сдвиг, при котором ВКФ достигала максимального значения, интерпретировался как задержка между показаниями оптического потока и гироскопа.

На рис. 10 представлен график расчёта взаимнокорреляционной функции для алгоритма, описанного выше. Точка, в которой ВКФ достигла максимума – и есть искаемая задержка.

Так при отключенных фильтрах гироскопа (рис. 10, параметр *DLPF_CFG* = 0) задержка составляет $\approx 18,3$ мс. При максимальном значении (*DLPF_CFG* = 6) задержка составляет $\approx -13,75$ мс. Отрицательное значение задержки говорит о том, что сигнал гироскопа запаздывает относительно оптического потока. Данный

метод позволил определить оптимальную частоту среза фильтра – 20 Гц. При этом остаётся небольшая задержка $\approx 2,1$ мс.

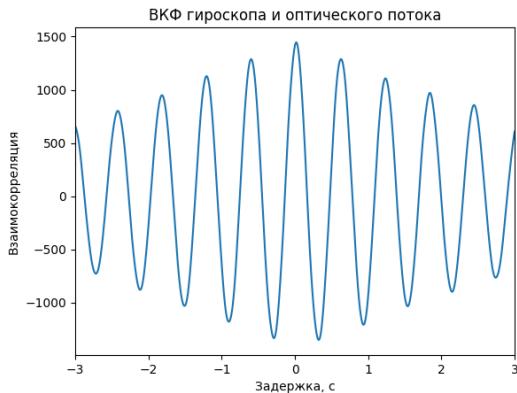


Рис. 10. Взаимокорреляция гироскопа и оптического потока

VI. КОМПЕНСАЦИЯ ЗАДЕРЖКИ

Грубая компенсация задержки выполнялась подбором фильтра низких частот в настройках гироскопа. Помимо компенсации задержки, снижение частоты среза фильтра позволило улучшить соотношение сигнал/шум для показаний гироскопа. Следующий этап компенсации задержки – удаление небольшой задержки ($\approx 2,1$ мс), которую невозможно устраниТЬ подбором фильтра.

Для этого, помимо накопления аккумулятора вращения ϕ , выполняется и сохранение последнего семпла гироскопа ω_t . Теперь накопленное вращение используется по следующей формуле:

$$\phi_p = \phi - \alpha \cdot \omega_t \cdot (1/f_g),$$

где ϕ_p – накопленное вращение для формируемого пакета, ϕ – аккумулятор вращения из выражения (6), α – степень использования последнего семпла ω_t , $\alpha = \text{delay} \cdot f_g$.

Так для значений $f_g = 100$ Гц и $\text{delay} = 2$ мс коэффициент $\alpha = 0,2$.

Затем в аккумулятор вращения вносится новое значение по следующему выражению:

$$\phi = \alpha \cdot \omega_t.$$

VII. ВТОРОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА

После компенсации задержки между оптическим потоком M и угловой скоростью ω была выполнена новая серия тестов.

В результате тестирования и анализа логов (рис. 1) было выявлено, что работа с синхронизацией позволила снизить шум скорости, вычисляемой по данным от датчика (оранжевая линия). Остались лишь выбросы в начале и в конце циклов разгона/торможения, когда БПЛА приобретает максимальную угловую скорость ω . Эти выбросы можно игнорировать, так как они малочисленны и эффективно подавляются фильтром Калмана, который дополнен данными об ускорении в мировых координатах, вычисленными с использованием блока инерциальной навигации, который подключен к полётному контроллеру.

Второе, что было улучшено – абсолютная точность позиционирования (рис. 2).

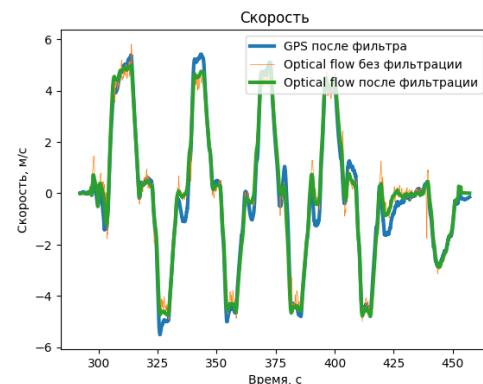


Рис. 11. Показания скорости по оптическому потоку и GPS

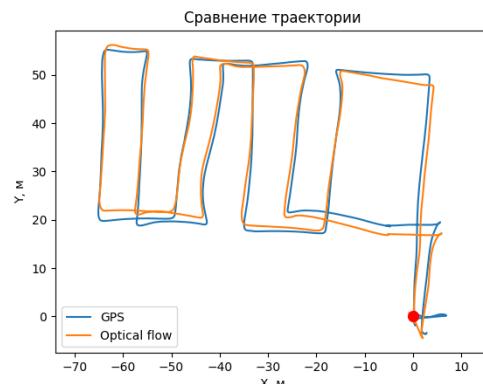


Рис. 12. Полёт на высоте 4,5 метра

Коррекция коэффициента перевода из ΔD в ΔM позволила повысить точность до 20 метров на высоте в 4,5 метра. Хотя было выявлено, что имеется неточность, связанная с работой датчика оптического потока на малой высоте – ошибка на ≈ 8 метров при взлёте (рис. 3).



Рис. 13. Отклонение пройдённого пути по оптическому потоку от GPS.
Высота – 4,5 метра

Анализ показал, что значение оптического потока M становятся актуальными лишь на высоте более 70 см. При высоте ниже – показания ниже фактических и связаны с фокусным расстоянием линзы.

Также был выполнен полёт на высоте 8 метров (рис. 14).

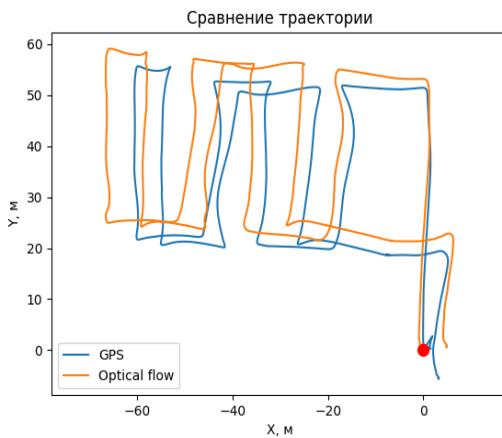


Рис. 14. Полёт на высоте 8 метров

Из графиков, представленных на рис. 14 видно, что при увеличении высоты полета БПЛА происходит и возрастание погрешности вычисления положения БПЛА с использованием информации от оптического потока.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании мы рассмотрели применение оптического потока для навигации автономных подвижных объектов, что представляет собой важное направление в современных системах навигации.

В ходе работы был разработан прототип оптической навигационной системы, обладающий следующими характеристиками:

- максимальная скорость: зависит от высоты, $v_{max} = 7,4c^{-1} \cdot h$, ограничение связано с максимальной скоростью оптического потока \dot{M} , которую может вычислить датчик в соответствии с выражениями (3) и (4);
- погрешность на высоте: 3 метра – 16 метров; 4 метра – 20 метров; 6 метров – 24 метра на 1000 метров пройденных.

Первое тестирование прототипа выявило несколько проблем, включая значительное отклонение измеряемой траектории и сильный шум в показаниях скорости. Для решения этих проблем была проведена коррекция улучшена синхронизация работы оптического потока и гироскопа с использованием взаимнокорреляционной функции для определения задержек.

Второе тестирование показало значительное улучшение точности навигации и снижение шума в показаниях скорости. Однако были выявлены проблемы с точностью

на малых высотах и при полетах на больших высотах, что связано с характеристиками используемых датчиков и фокусным расстоянием линзы.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- применение оптического потока в навигационных системах позволяет значительно улучшить точность и надежность навигации в условиях ограниченной доступности GPS;
- синхронизация данных от различных датчиков и корректировка коэффициентов преобразования являются ключевыми аспектами для достижения высокой точности навигации;
- для дальнейшего улучшения системы необходимо учитывать особенности работы датчиков на различных высотах и при различных условиях освещения.

В будущем планируется продолжить работу над улучшением алгоритмов синхронизации и компенсации задержек, а также провести более масштабные тесты в различных условиях окружающей среды. Также возможно исследование использования других датчиков и алгоритмов для повышения точности и надежности навигации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yu Gong, Xiaohong Liu. Flight state recognition for UAV optical flow velocity measurement // 2023 4th International Conference on Mechanical Instrumentation and Automation. Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – #2561. – 012025. – DOI: 10.1088/1742-6596/2561/1/012025.
2. Weidong Ding, Jinling Wang, Songlai Han, Ali Almagbile, Matthew A. Garratt, Andrew Lambert and Jack Jianguo Wang. Adding Optical Flow into the GPS/INS Integration for UAV navigation // International Global Navigation Satellite Systems Society. IGNSS Symposium 2009. – URL: http://www.mecinca.net/papers/DRONES_IMU/ding_et.al2009a.pdf.
3. Savan Chhaniyara, Pished Bunnun, Lakmal D. Seneviratne and Kaspar Althoefer. Optical Flow Algorithm for Velocity Estimation of Ground Vehicles: A Feasibility Study // International journal on smart sensing and intelligent systems. – March 2008. – Vol. 1, No. 1. – URL: <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.21307/ijssis-2017-289>.
4. Honegger Dominik & Meier Lorenz & Tanskanen Petri and Pollefeyns Marc. An open source and open hardware embedded metric optical flow CMOS camera for indoor and outdoor applications // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2013. – P. 1736-1741. – 10.1109/ICRA.2013.6630805.
5. Репозиторий PX4-Autopilot. – URL: <https://github.com/PX4/PX4-Autopilot>.
6. Derek Rowell. Signal Processing: Continuous And Discrete. – URL: <https://ocw.mit.edu/courses/2-161-signal-processing-continuous-and-discrete-fall-2008/>.

Сравнительный анализ преимуществ протоколов управления беспилотными летательными аппаратами

Костоглотов Андрей Александрович
Школа инновационной инженерии
и технологий гостеприимства
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Пятигорск, Россия
kostoglotov.and@yandex.ru

Михайлов Герман Георгиевич
Школа Кавказского гостеприимства
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Пятигорск, Россия
mr.ironfelix@mail.ru

Оробинская Валерия Николаевна
Отдел планирования и организации
научно-исследовательской работы
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Пятигорск, Россия
orobinskaya.val@yandex.ru

Аннотация. Стремительный темп развития технического и программного оснащения беспилотных летательных аппаратов из энтузиастического проекта перерос в тенденцию, захватывающую умы и порождающую массив новых вопросов и разработок в сфере. Прогресс коснулся всех аспектов отрасли – технических, конструкционных и программных. Каждый из аспектов является основополагающим и имеет огромное влияние, к примеру: изучение микроархитектуры полетных контроллеров позволяет создать на их базе новые решения, разработка новых винтов для пропеллеров, усовершенствование двигателей, позволяющим беспилотникам подниматься в воздухе, также помимо технических аспектов, не стоит забывать об аппаратной части отрасли беспилотных летательных аппаратов, как пример – протоколы передачи частот, которые непосредственно влияют на управление и маневренность FPV-дрона. Множество параметров являются решающими в пользу того или иного протокола передачи данных, будь то задержка передачи данных, либо же пре-градоустойчивость.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, радиоуправление, диапазон, управление, частота, протокол, передача данных, синтез.

I. ВВЕДЕНИЕ

В этой статье проведен сравнительный анализ с выявлением положительных и отрицательных сторон протоколов передачи данных, берущих за основу принципы радиоуправления, что также меняются и преображаются. Помимо протоколов передачи данных на базе радиоуправления будут рассмотрены альтернативные способы управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) и мониторинга выполнения полетных заданий, также будет уделено внимание факторам дестабилизирующего воздействия (ДЗ) на беспилотные летательные аппараты и мерам противодействия им путем применения методов системного анализа, распределенным системам управления, их применению в управлении БПЛА, и процедуре синтеза аддитивного распределенного регулятора.

II. ПРОТОКОЛЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

ExpressLRS (он же ELRS) – протокол радиоуправления (БПЛА), с открытым исходным кодом, предлагающий два диапазона частот: 915 МГц (в зависимости от

региона это может быть частота, равная 868 МГц), имеющий большую дальность, взамен требующий больших антенн, и 2.4 ГГц – с меньшим радиусом действия, и как следствие, использованием меньшего размера. Фактическая дальность стабильного действия при управлении дроном на базе протокола ELRS – 40 км, что является ключевым параметром при обеспечении надежности и преградоустойчивости сигнала, также имеет низкую задержку, позволяющую дрону быстрее выполнять команды, отдаваемые оператором. При регулировке скорости передачи данных, операторами может быть достигнут баланс большей дальности и меньшей задержки, при максимальной частоте в 500 Гц. Также из основополагающими преимуществ являются компактные габариты, что облегчает установку приемника на дрон, тем самым положительно влияя на его летные параметры.

Из преимуществ протокола выделяют: высокую дальность действия, низкую задержку, компактность (маленький размер антенн, обусловленный частотой протокола, что тоже выделяет ELRS на фоне конкурентов), удобство в обновлении программной части, экономичность и надежность (выражается в дешевизне и соотношении типа «цена/качество» при покупке оборудования для работы с протоколом), в сравнении с остальными протоколами радиоуправления, такими как FrSky, TBS, FlySky.

При наглядном сравнении ELRS с другими протоколами, такими как FrSky и TBS, заметным становится превосходство протокола по дальности действия, преградоустойчивости и обновлением программной прошивки.

Для обеспечения корректной настройки ELRS необходим передатчик (внешний, подходящий для подключения к пульта дистанционного управления или же интегрированный прямо в пульт управления) и приемник сигнала (ресивер), расположенный на печатной плате, или же имеющий внешние антенны. При завершении настройки приемник должен быть установлен на дрон путем пайки, и проведена процедура настройки, с соблюдением инструкций под конкретные модели ресивера.

FlySky за основу берет диапазон частот 2.4 ГГц, способной поддерживаться на расстоянии до 1 км. FrSky – работает также на частоте 2.4 ГГц, однако способен стablyно работать на большем расстоянии – 1.5 км, однако могут возникать задержки в передаче данных и нестабильность соединения на расстояниях от 500 метров, на это напрямую влияет приемник и его спецификации, оба протокола обладают поддержкой нескольких режимов работы, также способны к пропорциональному управлению и телеметрии.

TBS Crossfire – протокол, использующий диапазоны частот 915 МГц (в некоторых регионах может использоваться на частоте в 868 МГц), в числе его преимуществ – стабильное качество связи, высокая проникающая способность и дальность радиуса действия, имеет телеметрию, минусами же выступает высокая цена и закрытый исходный код, что влияет на выход обновлений прошивок, и отпугивает операторов, что при высокой цене аппаратуры на протоколе TBS, предпочтут к покупке оборудование с поддержкой ELRS [1].

Видеонавигация и альтернативные способы управления беспилотным летательным аппаратом

Помимо управления, важным аспектом в использовании беспилотных летательных аппаратов остается возможность отслеживания их местоположения и пройденного ими пути. Осуществить достойный уровень навигации беспилотных летательных аппаратов возможно с помощью использования методов видеонавигации, заключающейся в получении изображения камерой в реальном времени, затем проведение процедур анализа с помощью бортового компьютера, и в конце концов – получение координат и ориентации БПЛА в пространстве.

В базе своей видеонавигации имеет 3 базовых способа исполнения:

1. Вычисление пройденного пути на результатах, получаемых в следствие анализа получаемых бортовой камерой видеоматериалов, на первом кадре производится определение точек для отслеживания их движения внутри кадра, на основе этих сведений идет расчет изменения положения и ориентации камеры в пространстве, а следственно и БПЛА. Из недостатков можно выделить относительность определяемых координат, что может затруднить поиски беспилотного аппарата, ввиду неточности алгоритма, влияют на это такие факторы, как недостаток освещенности и проблематичность использования алгоритма на изображениях, сделанных в облачную погоду;

2. Вторым же способом можно выделить способ привязки рельефа по стереоэффекту, что проявляется себя при движении камеры, и использование данного способа позволяет нивелировать минусы первого способа. При использовании перекрытия изображений и видеоматериалов, происходит восстановление рельефа и его сравнение с изначально заданными данными, и в случае распознавания, получается определение точных координат и ориентации беспилотного летательного аппарата в пространстве. Из преимуществ метода выделяют возможность поиска как относительного, так и абсолютного

положений камеры, а недостаток его заключается в высокой чувствительности к ошибкам исходных координат, получаемых от приборов навигации;

3. Способ точной привязки, использующий эталонные фотографии – способ, в котором кадры видео сравниваются с изображениями ключевых точек маршрута, предварительно загруженными в память БПЛА, при корректном распознавании реального изображения и сопоставлении его с эталонным, происходит определение точных координат и ориентацию дрона в пространстве, способ позволяет обеспечить точность в определении координат без опоры на рельеф местности, как в случае со вторым способом, также метод способен осуществлять нахождение абсолютного положения камеры при неизвестных примерных координатах, что получается путем сканирования баз данных со снимками окружающей местности и процедуре сравнения с текущим (реальным) снимком [2].

Помимо способов управления, основанных на протоколах, существуют альтернативные способы управления беспилотным летательным аппаратом, такие как: аппаратура, использующая принцип дистанционного (радио-) управления на частотах 2.4 ГГц, Wi-Fi сети или телеметрию протокола MAVLINK. Для корректного и точного управления беспилотным летательным аппаратом, способным осуществлять свое движение в трех осях пространства, необходимо использовать тангаж, крен, рысканье, газ, а также комбинирование этих каналов. Процесс передачи команд от оператора с пультом ДУ к беспилотному летательному аппарату может осуществляться с помощью следующих способов:

1. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ), заключающаяся в том, что значения управляющего канала задаются шириной импульсов, недостатком является необходимость наличия отдельного провода под каждый канал.

2. Передача множества широтных импульсов – сигналы со всех каналов передаются по одному проводу, что провоцирует задержки в передаче данных, а как следствие – снижению управляемости и маневренности БПЛА.

3. SBUS и IBUS – протоколы, построенные на вариациях интерфейса UART, обладают низкой задержкой с большим количеством передаваемых команд и достойной помехозащищенности, отчего стали распространены.

Помимо передачи данных от приемника к передатчику, протоколы управления распространены и для регуляторов оборотов двигателей беспилотных летательных аппаратов: PWM, он же ШИМ – прямоугольные импульсы на частоте в 400 Гц, длительность импульсов влияет на частоту вращения и максимально возможную тягу двигателей, а OneShot42/125 и Multishot – протоколы, построенные на базе ШИМ, однако имеющие более высокую скорость. Общей чертой у этих протоколов является то, что все они являются аналоговыми, что негативно влияет на точность управления компонентами, использующие подобные протоколы передачи данных и требует регулярной калибровки [3].

Решения в области повышения устойчивости сигнала управления БПЛА от помех, вызванных как внешним техническим, так и естественным воздействием, является одним из приоритетных направлений в отрасли изучения беспилотных летательных аппаратов. В частности, при прогнозировании устойчивости систем дрона на устойчивость от помех, вызванных разрядом молнии, принято использовать данную методику:

1. Определение основных параметров беспилотного летательного аппарата, таких как его геометрия, габариты, материал фюзеляжа, конструкционные отличия.

2. Нахождение параметров магнитного поля, исходящего от разряда молнии.

3. Выбор коэффициентов для проведения физического моделирования, зависимость коэффициентов строится от показателей размера лаборатории, параметров генератора и габаритов исследуемого объекта.

4. На основе принятых коэффициентом масштаба, был проведен расчет значений параметров масштаба беспилотного летательного аппарата и источника помех электромагнитного спектра.

5. Разработка экспериментального стенда и модели БПЛА, имеющей внутри исследуемый контур. Для создания магнитного поля применяют одновитковую катушку, максимальные габариты беспилотного летательного аппарата не должны превышать 0.6 м.

6. Проведение экспериментов по измерению помех электромагнитного спектра в линиях связи тестовой модели БПЛА, учитывая воздействие на эту модель магнитного поля.

7. На базе полученных в ходе измерения значений, проводится моделирование помех, возникающих в линиях связи уже настоящего беспилотника.

8. Для составления прогнозов по помехоустойчивости электронных систем, установленных на борту БПЛА, проводят сравнение параметров электромагнитных помех линий связи, ведущих к потере данных и снижению скорости их передачи [4].

Дестабилизирующие воздействия на беспилотные летательные аппараты и меры противодействия им

В статье Кузнецова И.Е., Мельникова А.В., Рогозина Е.А. и Страшко О.В [5] был показан результат проведения ряда экспериментов и испытаний по расчету влияния крайне изменчивых погодных условий на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов, с использованием методов системного анализа. При работе над методологией оценки динамически изменяющихся показателей функционирования и эффективности выполнения полетных заданий беспилотными летательными аппаратами, с использованием математическая модель в связке с алгоритмом взаимодействия дестабилизирующих воздействий на работу БПЛА, необходимо:

1. Осуществить разработку классификационной схемы дестабилизирующих воздействий (ДВ), напрямую влияющих на эффективное и корректное исполнение полетных заданий с помощью FPV-дронов.

2. Структурно-логическая модель конфликтных взаимодействий ДВ и беспилотников.

3. Разработка и дальнейшее обоснование динамических показателей эффективности выполняемых дронами полетных заданий (ПЗ).

4. Составление стратегического плана по корректировкам траекторий дальнейших полетов, при потенциальной угрозе дестабилизирующих условий, оказывающих негативное влияние на беспилотные летательные аппараты и выполнение ими ПЗ в будущем.

5. Полная разработка математической модели, направленной на составление метеопрогнозов. [5].

Распределенные системы управления беспилотными летательными аппаратами

Помимо всех перечисленных выше систем и протоколов управления беспилотным летательным аппаратом, существует также распределенная система управления, основанная на кластерах компьютерных устройств и программного обеспечения (ПО), осуществляющего свое функционирование за счет вычислительных мощностей персональных компьютеров. Используются подобные системы во множестве сфер и отраслей, от промышленности до электроэнергетики, ввиду их эффективного контроля процессов.

За основу взято разделение задач управления и контроля между параллельно работающими устройствами, способными к обмену информацией, каждое отдельное устройство внутри распределенной системы управления (РСУ) – это узел, и осуществлять функции узла способен как стандартный персональный компьютер, так и виртуальная машина.

Эффективность систем управления распределенного типа основывается на нескольких принципах, таких как:

1. Децентрализация.
2. Коммуникация и синхронизация.
3. Распределенное хранение данных.
4. Масштабируемость.
5. Управление отказами.

Как и у любого способа связи с беспилотным летательным аппаратом, у распределенных систем управления (РСУ) есть свои преимущества и недостатки, представленные на табл. 1 [6].

ТАБЛИЦА 1. ПРЕИМУЩСТВА И НЕДОСТАТКИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ [6]

Преимущества	Недостатки
Масштабируемость	Сложность разработки
Гибкость	Сложность отладки
Надежность	Зависимость от сети
Распределенность	Сложность обеспечения безопасности

Качество систем связи и управления (ССУ) играет большую роль в качестве и скорости выполняемых беспилотником задач, потому ключевыми факторами в оценке системы связи выступают непрерывность, глобальность, и производительность. Путей для повышения производительности ССУ есть несколько, к примеру:

1. Увеличение возможности по поддержке автономной работы беспилотных летательных аппаратов, или же кластеров БПЛА.

2. Применение современных способов по сбору и обработке, а также удаленному доступу к информации

3. Процессы автоматизации процедур установления связи и выбора, ведущего БПЛА в кластере.

4. Возможность самостоятельной синхронизации шкалы времени, расположенной на борту беспилотника и работа его навигационных модулей или же систем.

При передаче данных по протоколам TCP/IP, необходимо проводить резервирование локальных вычислительных сетей, использующих протокол для связи, что положительно скажется на параметрах оперативности средств связи и управления, для этого используют следующие радиолинии:

1. Низкоскоростная локальная сеть (НАЛС).
2. Высокоскоростная локальная сеть (ВАЛС).
3. Фидерная локальная сеть (ФЛС).
4. Межретрансляторная локальная сеть (МЛС) [7].

Распределенное управление в беспилотных летательных аппаратах представлено и способно к настройке с помощью PID-регулятора, то есть устройство, позволяющее изменять и сохранять положение дрона в пространстве согласно пропорционально-интегрально-дифференцируемому закону.

Изменение даже одного из трех параметров в регуляторе отразится на поведении беспилотника при выполнении полетных заданий, схема расположения PID-регулятора в системе управления квадрокоптером продемонстрирована на рис. 1.

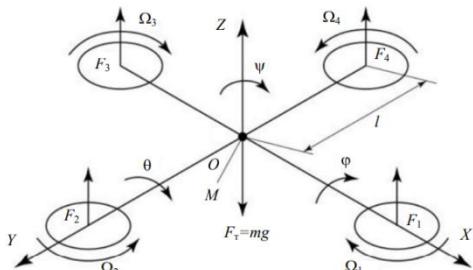


Рис. 1. Расположение регулятора в беспилотном летательном аппарате [8]

В сфере распределенных систем управления беспилотными летательными аппаратами работа строится на выполнении алгоритмов, как пример – адаптивного регулирования на основе эталонной модели управляемого объекта, что с помощью процесса изменения параметров, системных структур и воздействий на информацию, получаемую во время управления нацелен на обеспечение оптимального (удовлетворяющего нормам) качества, с учетом неопределенности в изменчивых условиях работы [9].

Структура эталонной модели адаптивного алгоритма представлена в уравнении (1).

$$W_{\text{эт}}(s) = \frac{1}{T_{\text{эт}} s + 1}, \quad (1)$$

После нахождения результата, соответствующего эталонной модели алгоритма, происходит образование сигнала эталонного поведения угла тангенса (наклона) беспилотного летательного аппарата, и при нахождении разности между эталонным ($\theta_{\text{эт}}$) и фактическим (θ) значениями, мы получим переменную e (2), необходимую в формуле формирования закона адаптации, заключающейся в нахождении скорости изменения адаптивного сигнала ($\dot{\theta}$), при помощи вычисления с переменными коэффициента усиления адаптации (Γ), фактического значения тангенса (θ) и разности эталонных и фактических значений наклона (e) (3) [9]:

$$e = \theta_{\text{эт}} - \theta \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = -\Gamma e, \quad (3)$$

Также, важным фактором является необходимость превалирования скорости адаптации над скоростью изменения параметров управляемого объекта. В эталонных условиях, адаптация должна правильно реагировать на малейшие изменения заданных изначально условий, входных данных с помощью использования быстродействующего механизма идентификации параметров управления, что обеспечит должную отзывчивость системы на изменения в командах, или на окружающее дестабилизирующее воздействие. В реальных же условиях, быстрые процессы адаптации приводят к высоким частотам сигналов управления, что является причиной потери в устойчивости управления [9].

В последнее время активно разрабатываются распределенные системы передачи информации [10–12]. Рассматриваемые системы имеют хорошую помехозащищенность и могут быть использованы для обеспечения связи с БПЛА

Была рассмотрена следующая задача [12]: для заданного входного воздействия (5), поступающего на пространственный фильтр, выделить заданную пространственную моду (шестую магистраль передачи информации [10, 11]) и определить «полезную» информацию. При этом был использован каскад пространственных фильтров [10–12].

$$U(x, \tau) = \sum_{\eta=1}^7 \bar{C}_\eta(\tau) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x), \quad \Psi_\eta = \frac{\pi \cdot \eta}{X_L},$$

$$\bar{C}_1(\tau) = \text{abs}(\sin(0.3 \cdot \tau)); \quad \bar{C}_2(\tau) = 1 \text{ if } \sin(\tau) > 0,$$

$$\text{else } \bar{C}_2(\tau) = 0;$$

$$\bar{C}_3(\tau) = 2 - \sin(\tau);$$

$$\bar{C}_4(\tau) = \sin(4 \cdot \tau); \quad \bar{C}_5(\tau) = \sin(5 \cdot \tau);$$

(полезная информация,
передаваемая по шестой магистрали)

$$\bar{C}_6(\tau) = \sin(6 \cdot \tau);$$

$$\bar{C}_7(\tau) \sin(7 \cdot \tau).$$

Наложим на входное воздействие помеху ($f_p = 500 \cdot \sin(500 \cdot \tau)$).

Входное воздействие на пространственный фильтр записывается в виде [12]:

$$\hat{U}(x, \tau) = U(x, \tau) + 500 \cdot \sin(500 \cdot \tau). \quad (4)$$

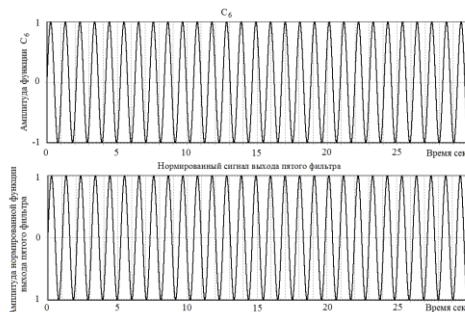


Рис. 2. Сигнал C_6 и нормированный сигнал выхода пятого фильтра [12]

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показывают эффективность использования пространственных фильтров, при выделении заданной магистрали передачи информации (заданной пространственной моды).

Амплитуда помехи, которая воздействовала на совокупность пространственных мод ($U(x, \tau)$), в 500 раз больше амплитуды полезных сигналов $\bar{C}_i(\tau)$, $i = 1, \dots, 7$.

Пространственный фильтр вырезает рассматриваемую помеху, при выделении полезного сигнала (см. рис. 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://dzen.ru/a/ZiLBSqVdQCIE3k75> [Электронный ресурс] (дата обращения: 17.06.2024).
2. Семенова Л.Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] (дата обращения: 17.06.2024).

3. Бобылев Ф.А., Маркелов М.К. Пример создания полетного контроллера беспилотного летательного аппарата на базе микроконтроллера STM32 [Электронный ресурс] (дата обращения: 17.06.2024).
4. Нуриев М.Г. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств беспилотного летательного аппарата [Электронный ресурс] (дата обращения: 17.06.2024).
5. Кузнецов И.Е., Мельников А.В., Рогозин Е.А., Страшко О.В. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа [Электронный ресурс] (дата обращения: 19.06.2024).
6. <https://nauchniestati.ru/spravka/raspredelennye-sistemy-upravleniya/#:~:text=Распределенные%20системы%20управления%20широко%20применяются,повышая%20производительность%20и%20надежность%20системы> [Электронный ресурс] (дата обращения: 19.06.2022).
7. Пантелеимонов И.Н., Белозерцев А.В., Монастыренко А.А., Бочва В.В., Наумкин А.В. Основные направления создания высоконадежной системы связи и управления БПЛА [Электронный ресурс] (дата обращения: 19.06.2024).
8. Баранов О.В. Алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера [Электронный ресурс] (дата обращения: 19.06.2024).
9. Архипов А.В., Тимошенков С.П. Применение адаптивных регуляторов в системах управления беспилотными летательными аппаратами // Известия вузов. Электроника. – 2022. – Т. 27, № 5. – С. 652–663.
10. Першин И.М. Распределенные системы обработки информации. – Из-во РИА КМВ, 2008. – 148 с. 2. Малков А.В, Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.
11. Веселов Г.Е., Першин И.М. Системы передачи и обработки распределенной информации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 5. – С. 123–137.
12. Першин И.М. Исследование характеристик пространственных фильтров // Современная наука и инновации. Научный журнал. – 2024. – Вып. № 2 (46). – С. 48–48.

Девятиосевая система ориентации в пространстве для повышения стабильности позиционирования

Маркова Дана Константиновна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
dmarkova@sfedu.ru

Басан Елена Сергеевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ebasan@sfedu.ru

Вахрушев Дмитрий Евгеньевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vakhrushev@sfedu.ru

Аннотация. В данной статье обсуждается девятиосевая система ориентации, основанная на данных, поступающих с акселерометра, гироскопа и магнитометра, используемых в беспилотных авиационных системах. Основное внимание уделено применению комплементарных фильтров для объединения показаний различных сенсоров с целью минимизации ошибок, таких как шум, дрейф гироскопа и магнитные возмущения. Приведены математические модели обработки данных для каждого сенсора и алгоритмы их слияния, направленные на повышение точности определения ориентации.

Abstract. This paper discusses a nine-axis orientation system based on data from an accelerometer, gyroscope, and magnetometer used in unmanned aircraft systems. The focus is on the use of complementary filters to combine the readings of different sensors in order to minimize errors such as noise, gyroscope drift, and magnetic disturbances. Mathematical models of data processing for each sensor and algorithms of their fusion aimed at improving the accuracy of orientation determination are presented.

Ключевые слова: девятиосевая система ориентации, инерциальные датчики, акселерометр, гироскоп, магнитометр, беспилотные авиационные системы (БАС).

Keyword: nine-axis orientation system, Euler angles, quaternions, inertial sensors, accelerometer, gyroscope, magnetometer, unmanned aircraft systems (UAS).

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные беспилотные авиационные системы (БАС) предъявляют высокие требования к точности управления и ориентации в пространстве для успешного выполнения различных задач. Одной из важнейших задач является корректное определение положения аппарата в трехмерном пространстве, что достигается с помощью инерциальных датчиков, таких как акселерометры, гироскопы и магнитометры [5]. Эти сенсоры позволяют определить положение объекта по угловым скоростям и смещениям, часто применяя модели ориентации на основе углов Эйлера. В данной статье рассматривается девятиосевая система ориентации, использующая данные с трехосевого акселерометра, гироскопа и магнитометра для повышения точности определения ориентации БАС.

II. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

IMU (инерциальный измерительный блок) представляет собой электронное устройство, измеряющее ускорение, угловое перемещение и индукцию магнитного поля в пространстве (рис. 1). Это устройство состоит из комбинации акселерометра, гироскопа и магнитометра, каждый из которых измеряет по трем взаимно перпендикулярным осям [1]. С их помощью можно определить ориентацию объекта относительно поверхности Земли, что играет ключевую роль в инерциальных системах позиционирования.

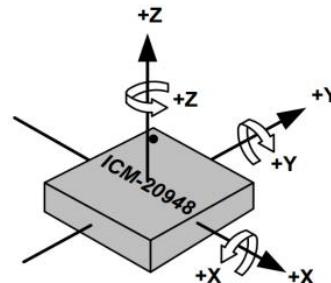


Рис. 1. Схема устройства IMU

Акселерометр является инерциальным датчиком, измеряющим кажущееся линейное ускорение (КЛУ), определяемое как изменение скорости движения объекта. Измерение ведется в единицах g ($1g = 9,81 \text{ м/с}^2$). В зависимости от конструкции акселерометр может измерять ускорение по одной, двум или трём осям [4]. КЛУ представляет собой разницу между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением. Применение акселерометров включает системы определения угла наклона, где ускорение свободного падения используется для вычисления угла отклонения. Однако, точность акселерометров ограничивается такими факторами, как температурные изменения, вибрации, внутренние шумы, что снижает надежность использования акселерометра как единственного источника данных о движении [2].

Гироскоп в составе IMU измеряет угловую скорость с использованием эффекта Кориолиса [6]. Данные гироскопа позволяют вычислить изменение угла ориентации путем интегрирования угловой скорости. Гироскопы более точны для кратковременных измерений, однако склонны к накоплению ошибок из-за дрейфа, вызванного смещением ну-

левой точки. Для минимизации этих ошибок применяется калибровка, позволяющая скорректировать показания за счет учета систематических смещений.

Магнитометр измеряет проекцию индукции магнитного поля на оси чувствительности. Как и другие датчики, магнитометр подвержен погрешностям, которые могут возникать вследствие искажений магнитного поля. Основные виды искажений включают эффект "твёрдого железа", вызванный присутствием постоянного магнита, и эффект "мягкого железа", возникающий при воздействии внешних объектов, искажающих магнитное поле [3].

Для начала необходимо вычислить углы поворота в инерциальной системе. Данные гироскопа используются для расчёта угла поворота интегрированием угловой скорости. Вектор угловой скорости на каждом временном шаге даёт изменения угла, которые суммируются для получения текущего угла ориентации объекта. Однако из-за накопления ошибок, вызванных смещением гироскопа и неточностью измерений, происходит дрейф угла. Этот недостаток требует использования дополнительных данных для коррекции. С помощью данных гироскопа рассчитывается разница угла по каждой оси.

$$\delta_x = \omega_x * \Delta t, \quad (1)$$

$$\delta_y = \omega_y * \Delta t, \quad (2)$$

$$\delta_z = \omega_z * \Delta t, \quad (3)$$

где $\delta_{x,y,z}$ – разница углов, рассчитанная по показаниям гироскопа в интервале времени между текущим и предыдущим измерениями, $\omega_{x,y,z}$ – угловая скорость, рассчитанная по гироскопу.

На основе показаний акселерометра можно рассчитать угол наклон. Однако показания акселерометра чувствительны к кратковременным ускорениям, вызванным движениями устройства, что приводит к шумам в измерениях. Для начала вычисляется угол по тангажу и крену.

$$\beta_x = \arctan(a_y, \sqrt{a_x^2 + a_z^2}), \quad (4)$$

$$\beta_y = \arctan(-a_x, a_z), \quad (5)$$

где $\beta_{x,y}$ – угол, рассчитанный по показаниям акселерометра, $a_{x,y}$ – значения, полученные с акселерометра.

Для получения более точной оценки угла ориентации используют комплементарный фильтр, который комбинирует показания гироскопа и акселерометра. Принцип комплементарного фильтра заключается в том, чтобы медленные изменения угла брать из показаний акселерометра, а быстрые – из гироскопа. Для корректных вычислений используется динамический коэффициент фильтрации. Таким образом, данные гироскопа корректируются, что позволяет минимизировать дрейф, а данные акселерометра сглаживаются для уменьшения шума. Благодаря комплементарному фильтру мы узнаем углы поворота вокруг осей X и Y, используя значения, полученные выражениями (1, 2, 3, 4).

$$\varphi_t = \alpha \cdot (\varphi_{t-1} + \delta_x) + (1 - \alpha) \cdot \beta_x, \quad (6)$$

$$\theta_t = \alpha \cdot (\theta_{t-1} + \delta_y) + (1 - \alpha) \cdot \beta_y, \quad (7)$$

где φ_t – угол поворота вокруг оси X, θ_t – угол поворота вокруг оси Y, α – коэффициент фильтрации.

Чтобы вычислить поворот по оси Z (азимут), нужно получить данные о магнитном поле с датчика магнитометра и скорректировать эти данные с учётом наклона устройства (по осям X и Y) на основе показаний акселерометра. Для этого требуется создать матрицу поворота одновременно по осям X и Y. При перемножении матрицы поворота по осям X и Y и матрицы значений магнитометра по трем осям получается матрица скорректированных значений магнитометрических данных, учитываемых тангаж и крен, и получившиеся выражения выглядят так.

$$\mu_x = B_x * \cos(\varphi) + B_z * \sin(\varphi), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu &= B_x * \sin(\varphi) * \sin(\theta) + \\ &B_y * \cos(\theta) - B_z * \sin(\theta) * \cos(\varphi), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\mu_{x,y}$ – скорректированные значения магнитометра по оси X, Y с учетом других осей, $B_{x,y,z}$ – значения магнитометра по осям X, Y, Z.

Из полученных значений вычисляем азимут по следующей формуле:

$$\sigma_z = \arctan(\mu_x, \mu_y), \quad (10)$$

где σ_z – угол по оси Z.

Для учёта быстрого изменения углов и коррекции дрейфа гироскопа можно использовать комплементарный фильтр (11), учитывающий азимут, полученный из данных магнитометра и акселерометра.

$$\psi_t = \alpha \cdot (\psi_{t-1} + \delta_z) + (1 - \alpha) \cdot \sigma_z, \quad (11)$$

где ψ_t – угол поворота вокруг оси Z относительно заданной в начале системы координат в текущий момент времени.

В итоге по данным, полученным с инерциального измерительного блока, мы получили углы поворота вокруг всех осей с помощью комплементарных фильтров.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проведения тестирования получившегося алгоритма был взят роторный гироскоп, к которому был приделан инерциальный измерительный блок ICM-20948, содержащий гироскоп, акселерометр и магнитометр (рис. 2).

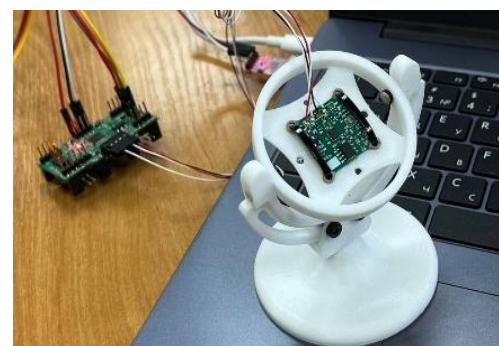


Рис. 2. Устройство для тестирования алгоритма

Сначала были определены оси тангажа, крена и азимута по показаниям датчиков. Затем был произведен расчет углов поворота по осям X и Y с помощью выражений (6, 7). Оставив устройство в состоянии покоя, по показаниям графика можно увидеть дрейф угла, рассчитанного по данным с гироскопа, и колебания угла, получено из акселерометра (рис. 3).

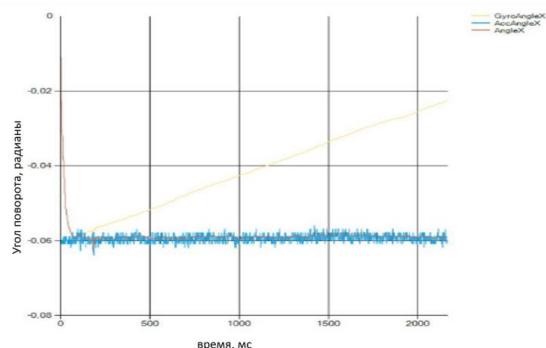


Рис. 3. График показаний углов поворота, когда устройство находится в состоянии покоя

Вращая устройство по всем осям, на графике можно увидеть, что скорректированный угол поворота по оси X сглаживает шум, полученный с акселерометра, и минимизирует дрейф нуля с гироскопа (рис. 4). Аналогичный результат получается с углом поворота по оси Y.

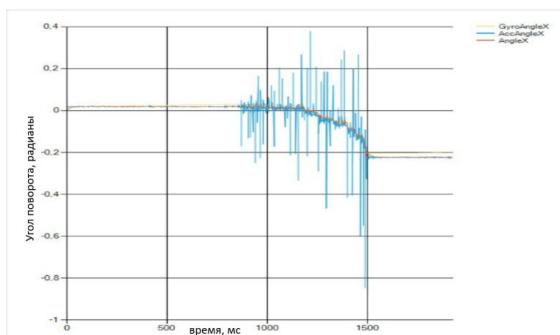


Рис. 4. График показаний углов поворота, когда устройство находится в состоянии покоя

Для получения азимута используются данные со всех трёх датчиков. По описанному алгоритму получается угол в пределах от π до $-\pi$. На графике показан скорректированный угол относительно угла по гироскопу и угла по акселерометру и магнитометру (рис. 5).

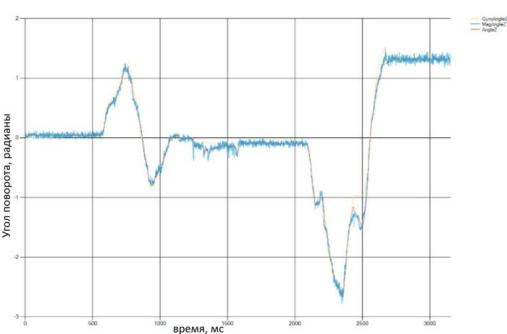


Рис. 5. График показаний угла поворота по азимуту

IV. Выводы

В ходе работы был разработан алгоритм, позволяющий рассчитать углы поворота каждой оси относительно системы координат NED. Для усовершенствования алгоритма надо добавить учитывание погрешности максимально измеряемой угловой скорости и обработку ситуаций с граничными значениями углов.

Девятиосевые системы ориентации, основанные на инерциальных датчиках, являются ключевым элементом в управлении беспилотными авиационными системами. Таким образом, использование комбинированных данных магнитометра, акселерометра и гироскопа в современных навигационных системах обеспечивает высокую точность определения направления на север даже в условиях магнитных возмущений и подвижности устройства, что делает этот подход перспективным для дальнейшего развития мобильных и портативных систем навигации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Suryanto W. et al. IMU (inertial measurement unit) device for internet of things based disaster early warning system: applications and innovation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 451, No. 1. – P. 012015.
2. Максюшин Г.В., Соболева Н.С. Учет погрешностей МЭМС-акселерометра при его моделировании // Политехнический молодежный журнал. – 2019. – № 02. – С. 1-7.
3. Русских М. Магнитометры: принцип действия, компенсация ошибок // Радиолоцман. – 2012. – № 9. – С. 31.
4. Xao L.B. Определение параметров ориентации на основе МЭМС акселерометра и магнетометра // Инженерия для освоения космоса: сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г. – Томск, 2016. – С. 139-143.
5. Грибин М.А., Евдокимов А.О. Анализ фильтров для обработки зашумленных данных с гироскопа, акселерометра и магнитометра // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. – 2016. – № 3. – С. 14-18. – EDN XUVNDJ.
6. Патент № 2476823 С2 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Способ измерения при помощи гироскопической системы: № 2010130301/28: заявл. 19.12.2008 : опубл. 27.02.2013 / К. Линьон, А. Карр; заявитель САЖЕМ ДЕФАНС СЕКЮРИТЕ. – EDN WWTGPC.

Анализ применения FPV-дронов: проблемы

Напалкин Максим Юрьевич
Редакционно-издательский центр
Пятигорского института (филиал) СКФУ
Пятигорск, Россия
maksnapalkin@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу применения FPV-дронов на специальной военной операции (СВО). Актуальность работы обусловлена тем, что опыт СВО на Украине продемонстрировал всему миру, что даже такой, казалось бы, безобидный инструмент, как квадрокоптер, может стать грозной военной силой применяемой в бою.

Ключевые слова: FPV-дроны, применение, составные компоненты, применение дронов на СВО, функционал, проблемы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Массовое применение FPV-дронов в современных локальных конфликтах радикально изменило картину современной войны.

Успешное применение одного или нескольких дешевых беспилотников позволяет уничтожать технику стоимостью в миллионы долларов. Об этом свидетельствуют многочисленные отчеты об уничтоженной технике и живой силе противника с помощью FPV-дронов.

Дроны FPV – это беспилотные летательные аппараты, которые оснащены функцией «вид от первого лица» (First Person View – сокращенно FPV). Что такое режим FPV – это функция передачи видео в реальном времени при помощи камеры, установленной в передней части БПЛА. Формально FPV-дроном можно считать любой БПЛА.

В сфере полетов дронов с видом от первого лица (FPV) связь между системой передачи изображения и системой дистанционного управления имеет решающее значение для обеспечения плавного и захватывающего опыта. Давайте разгадаем тонкости этих систем и расшифруем значение часто используемых сокращений.

II. СОСТАВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ FPV-ДРОНОВ

Чтобы правильно подойти к развитию темы, будет лучшим начать с общего представления основных компонентов FPV-дrona, благодаря которым дрон может летать, а пилот осуществлять им управление в режиме от первого лица:

1. Рама.
2. Электромоторы.
3. Пропеллеры.
4. Регулятор оборотов.
5. Полетный контроллер.
6. Аккумуляторные батареи.
7. Радио аппаратура управления.

Рама – это основной и несущий элемент конструкции квадрокоптера, к которому крепятся все прочие комплектующие. Рама состоит из двух частей: фюзеляж и лучи. Пример представлен на рис. 1.



Рис. 1. Рама

На фюзеляже обычно размещают электронику и полезную нагрузку, а на лучах – моторы и регуляторы.

Рама квадрокоптера должна быть достаточно прочной, чтобы не сломаться после первого падения или столкновения с препятствием. Когда говорят про размер дрона, обычно упоминают именно размер рамы, который является расстоянием между диагонально расположенным моторами.

Если дрон имеет размер меньше 150 мм, то он является микро-дроном, а от 150 до 300 мм – уже мини-дрон.

Рамы изготавливаются из пластика, дерева, стекловолокна, текстолита, алюминия и так далее. Самым популярным материалом для рам является карбон. Он очень легкий, прочный. Рама из карбона прослужит намного дольше, чем рама из другого материала. Но несмотря на это, у карбона есть небольшой минус: он очень хорошо проводит электричество, и если оголенные проводакоснутся рамы, то может произойти короткое замыкание.

Моторы. Электромоторы бывают двух видов: бесколлекторные и коллекторные. Бесколлекторные моторы надежные и мощные, поэтому их используют и в мини-дронах, и в более крупных аппаратах. А вот коллекторные моторы используются в малоразмерных дронах с диагональю рамы до трех дюймов, т.е. микро- и мини-дронах и игрушках, потому что они простые, небольшие и самое главное – недорогие. Пример представлен на рис. 2.



Рис. 2. Моторы

При выборе мотора необходимо обращать внимание на характеристику «рейтинг KV». Рейтинг KV – максимальное число оборотов, которое может развить мотор без потери в мощности при заданном напряжении.

Если нам необходим беспилотник для стабильного полета, то необходимо приобретать мотор с низким значением KV (например, от 500 до 1000). Для акробатического полета KV должен быть между 1000 и 1500.

Также производители бесколлекторных моторов указывают в спецификации информацию о максимально возможной тяге, которая создается мотором в совокупности с рекомендуемым несущим винтом. Тяга обычно изменяется в килограммах (Kg/Kg), фунтах (Lbs) или Ньютонах (N).

Предположим, вы собираете квадрокоптер и тяга одного мотора равно 0,5 кг, тогда 4 мотора смогут поднять до 2 кг груза. То есть если ваш аппарат будет чуть меньше двух килограммов, то взлететь он сможет только при максимальном количестве оборотов, поэтому в данном случае лучше выбрать более мощную связку «мотор + несущий винт», которая позволит обеспечить большую тягу, либо уменьшить общую массу беспилотника.

Таким образом, получается, что при максимальной тяге силовой установки в два килограмма идеальный вес дрона должен составлять не более половины этого значения, то есть 1 кг.

Пропеллеры. Воздушный винт или пропеллер – лопастной агрегат, работающий в воздушной среде, приводимый во вращение двигателем и являющийся движителем, преобразующим мощность (крутящий момент) двигателя в действующую движущую силу тяги. Пример представлен на рис. 3.



Рис. 3. Пропеллеры

Винты в беспилотниках имеют 2 или 3 лопасти. Чем меньше диаметр винта, тем его легче ускорять или замедлять, такая функция необходима во время акробатического полета.

Существуют 2 вида несущих винтов, которые врашаются по часовой стрелке (CW) либо против часовой стрелки (CCW).

Чтобы определить направление вращения, необходимо обратить внимание на наклон лопасти. Если правая кромка лопасти выше – вращение идет по часовой стрелке (рис. 4,а), если левая кромка – против часовой (рис. 4,б).

При выборе пропеллеров необходимо обратить внимание на материал, из которого они изготовлены. Пластмасса (ABS/Нейлон и тому подобное) является самым популярным выбором, так как винты из такого материала отличаются низкой стоимостью, долговечностью и хорошими характеристиками.

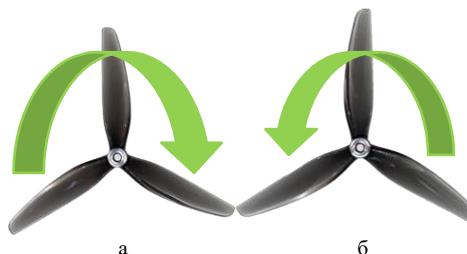


Рис. 4. Вращение винтов: а – по часовой стрелке (CW); б – против часовой стрелки (CCW)

Также стоит обратить внимание на пропеллер, изготовленный из пластика с добавлением углеродного волокна (карбона). Такой винт будет дешевле, чем полностью изготовленный из карбона, но качественнее, чем просто из пластмассы.

Регулятор оборотов. Electronic Speed Controller, или сокращенно ESC – это регулятор хода или скорости. Задача регулятора оборотов заключается в передаче энергии от аккумулятора к бесколлекторному мотору. Потребность в применении возникла вследствие особенности работы бесколлекторных моторов, так как аккумулятор отдает постоянный ток, а мотор принимает трехфазный переменный ток. Пример представлен на рис. 5.

Регулятор работает по следующему принципу. На вход подается напряжение с аккумулятора и сигнал с полетного контроллера, а на выход отдается управляющее напряжение для привода. Поэтому при подборе регулятора оборотов следует обращать внимание на максимальный ток для мотора и совместимость с полетным контроллером. Обычно максимальный ток работы мотора можно узнать в документации производителя мотора и добавить 20%. Соответственно, если мотор потребляет 25A, то следует выбрать регулятор, рассчитанный на 30A.

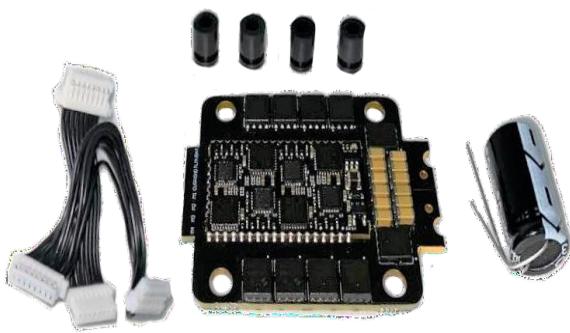


Рис. 5. Регулятор оборотов

Работа регулятора оборотов с полетным контроллером обеспечивается с помощью протокола. Первые регуляторы оборотов работали по обычному ШИМ-сигналу. Но со временем начали появляться более усовершенствованные протоколы передачи, такие как Multishot, One Shot, DShot300, DShot600, DShot1200. Это стоит учитывать при выборе как полетного контроллера, так и регулятора оборотов.

Полетный контроллер. Беспилотникам необходима стабилизация в полете для сохранения баланса беспилотного летательного аппарата в воздухе. Для этого используют полетный контроллер. Пример представлен на рис. 6.

Полетный контроллер – электронное устройство, представляющее собой вычислительную систему,ирующую по сложным алгоритмам и управляющую полетом беспилотного летательного аппарата.

Основными параметрами, по которым выбирается полетный контроллер, являются его размер, прошивка, процессор, датчики, порты и комплектация.



Рис. 6. Полетный контроллер

Полетные контроллеры постоянно эволюционируют. Они становятся меньше, процессоры – быстрее, появляется больше функциональных особенностей.

На сегодняшний день популярными для минидронов являются контроллеры размерами 30x30 мм и 20x20 мм. Размер полетного контроллера нужно учитывать при выборе рамы беспилотника.

Прошивка полетного контроллера – это реализация функций, которые сможет осуществить ваш беспилотник. Например, используя прошивку iNav, вы можете использовать GPS и настраивать полет по заданному маршруту, в то время как другие прошивки могут не поддерживать этот функционал.

Betaflight – прошивка с открытым исходным кодом. Она разрабатывается большим количеством людей. Betaflight является самой популярной прошивкой для мини-дронов и поддерживает большое количество полетных контроллеров. При выборе полетного контроллера обратите внимание на то, какими прошивками он поддерживается. Об этом можно узнать либо в документации прошивки, либо на сайте производителя персонального компьютера (ПК).

В полетных контроллерах для мини-дронов в настоящее время используются 4 серии контроллеров STM32: F1, F3, F4, F7. Они отличаются вычислительными мощностями и размером памяти. F1 – менее мощный и имеет меньше памяти, F7 – соответственно, самый мощный из представленных. Также стоит учитывать, что от процессора зависит количество доступных последовательных портов. Например, у полетного контроллера с F1 обычно только 2 порта, у F3 и F4 может быть от 3 до 5, а у F7 – 6 или даже 7.

В настоящее время на рынке представлены контроллеры различных комплектаций. Существуют контроллеры с платами распределения питания, а также включающие в себя даже регуляторы оборотов. Такие контроллеры имеют маркировку AIO в названии. AIO – сокращение от All-in-One (т.е. «все в одном») – это компьютерная система, в которой все необходимое оборудование объединено в едином корпусе. Также полетные контроллеры могут продаваться вместе с регуляторами оборотов, но на разных платах отдельно. Такие комплекты называются Flight Stack.

Аккумуляторные батареи. Аккумулятор – устройство для накопления энергии с целью ее последующего использования.

Большинство дронов питается от литий-полимерных аккумуляторов (сокращенное название LiPo, Li-Po или Li-Pol).

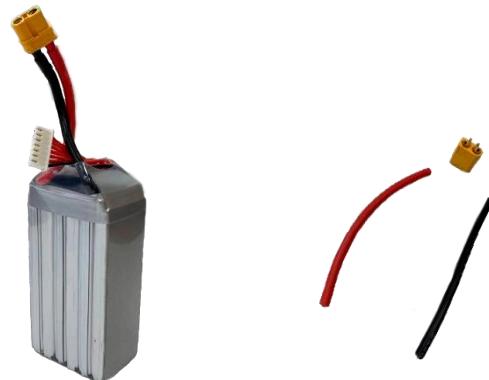


Рис. 7. Аккумуляторная батарея и силовые проводас креплением XT60

Каждая LiPo-батарея состоит из отдельных элементов или ячеек (обозначаются «S» и обычно их называют «банками»). Номинальное напряжение на одной ячейке составляет 3,7В. В таблице, которая сейчас представлена на экране, соответственно приведены напряжения на аккумуляторных батарейках из различного количества ячеек. Чтобы увеличить напряжение аккумулятора, элементы соединяют последовательно и формируют одну батарею.

Показатель того, сколько тока можно получить от аккумулятора в течение часа, называется емкостью и измеряется в мАч (mAh). С увеличением емкости аккумулятора соответственно увеличивается время полета, но также увеличивается масса и физические размеры аккумуляторной батареи

В своей спецификации литий-полимерные аккумуляторы имеют параметр С-рейтинг – токоотдача, или скорость разряда. Зная номинальное значение токоотдачи и емкость батареи, мы можем рассчитать теоретически безопасный постоянный ток разряда: Макс. ток разряда = С-Rating × Емкость/1000.

При выборе аккумулятора обращайте внимание на разъемы. Каждый литий-полимерный аккумулятор имеет два набора проводов с двумя разъемами. Первый разъем – основной или разрядный. Второй – балансировочный провод. Основной разъем обычно оснащается разъемами XT-30, XT-60, XT-90 и предназначен для подключения к дрону и для зарядки. Балансировочный разъем служит доступом к напряжению на каждой банке аккумулятора и используется для балансировочной зарядки или проверки напряжения аккумулятора. Количество проводов всегда на 1 больше, чем количество банок аккумулятора (плюсы от каждой банки и 1 общий минус).

Радиоаппаратура управления. Обычно управление БПЛА осуществляется человеком с помощью радиоаппаратуры управления на земле. На БПЛА установлен приемник, принимающий команды оператора и далее отправляющий их на полетный контроллер.

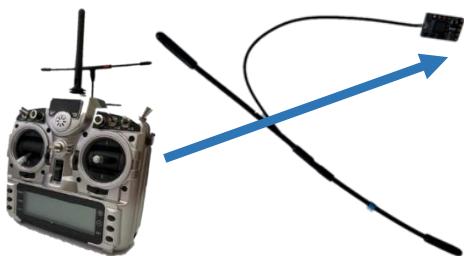


Рис. 8. Радиоаппаратура

Первое, на что стоит обратить внимание при выборе устройства связи, – число поддерживаемых каналов как на передатчике, так и на приемнике. Существует 4 основных канала: газ, рысканье, тангаж и крен. Они расположены на стиках управления. Остальные каналы считаются дополнительными и могут быть привязаны к тумблерам или отвечать за передачу информации. Первые аппаратуры управления поддерживали небольшое количество каналов, но с развитием периферийных устройств, подключаемых к дрону, потребность в дополнительных каналах росла. Современные аппаратуры управления поддерживают до 24 каналов [1].

Большинство современных систем управления минидронов работает на частоте 2,4ГГц. Данная частота является оптимальной для мини-дронов и позволяет направлять аппарат на расстояние до 3 километров. Существуют и дальнобойные модули, работающие на частоте 900 МГц и 433 МГц, способные работать на дистанции до 20 км. Все производители передатчиков используют алгоритмы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты, так что использовать аппаратуру стало очень

просто. Программное обеспечение постоянно сканирует эфир для поиска наилучшей частоты, отслеживает помехи и автоматически переходит на свободные каналы. Это происходит множество раз в секунду, так что вы не увидите пауз или сбоев управления. Еще одно достоинство этих алгоритмов в том, что вы можете одновременно летать с другими пилотами, не боясь заглушить их аппаратуру [6].

Компоненты системы передачи изображения

- VTX (видеопередатчик). VTX – это компонент, отвечающий за передачу живого видео с дрона на землю. Он принимает видеосигнал с камеры FPV, установленной на дроне, и передает его по беспроводной сети на землю, где он принимается VRX.
- VRX (видеоприемник). На земле VRX принимает передаваемый видеосигнал от видеопередатчика. Затем он выводит этот сигнал на устройство отображения, такое как очки FPV или монитор, позволяя пилоту видеть изображение с дрона в реальном времени.

Компоненты системы дистанционного управления

- TX (передатчик). В контексте системы дистанционного управления TX означает передатчик. Передатчик представляет собой портативное устройство, которым управляет пилот. Он посылает дрону управляющие сигналы, приказывая ему выполнить определенные маневры, изменить направление или отрегулировать высоту. По сути, TX – это командный центр пилота.

Прием (Приемник). RX – это приемник на дроне, который захватывает и интерпретирует сигналы управления, отправленные передатчиком (TX). Он преобразует эти сигналы в действия, такие как регулировка скорости двигателя или изменение ориентации дрона.

Соединение между системами передачи изображений и системами дистанционного управления.

В то время как VTX и VRX обеспечивают передачу видео, TX и RX управляют связью между пилотом и дроном:

Пилот управляет передатчиком (TX), отправляя сигналы дрону.

Приемник (RX) дрона улавливает эти сигналы и преобразует их в действия. Одновременно видеопередатчик дрона передает видео в реальном времени на землю. Эта двойная система связи позволяет пилоту управлять дроном и видеть его перспективу в режиме реального времени.

Такие дроны в гражданской жизни использовались для развлечений, например, в спортивных гонках. Они могут нести полезную нагрузку, но в то же время дроны FPV не имеют автопилота и летают без GPS. Дроны демонстрируют исключительную маневренность и способны быстро менять направление. Это требует от оператора высоких навыков и уровня подготовки, поскольку ему приходится вручную управлять всеми процессами полета. Характеристики дрона зависят от конкретной модели. Такие дроны способны развивать скорость более 100 километров в час и даже больше [2].

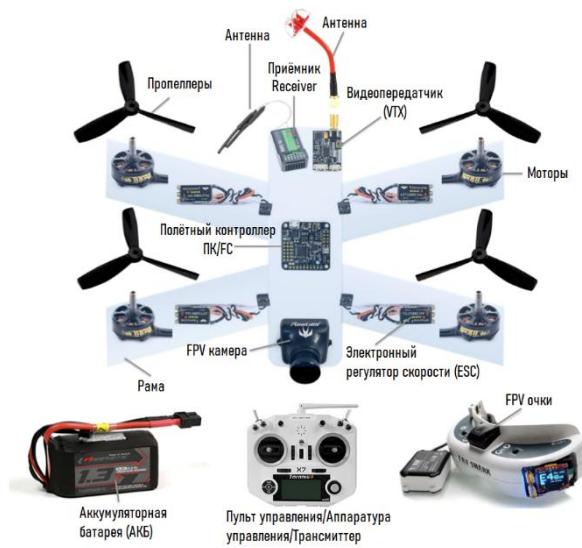


Рис. 6. Анализ устойчивости замкнутой системы [10]

III. ПРИМЕНЕНИЕ FPV-ДРОНОВ НА СПЕЦИАЛЬНОЙ ВОЕННОЙ ОПЕРАЦИИ

Наиболее широкое применение FPV-дроны получили с началом специальной военной операции (далее – СВО) на Украине. Беспилотники эксплуатируются различными подразделениями противоборствующих сторон: службами безопасности, силами специальных операций, военной разведкой и т.д. Обычно военные действуют небольшими группами, состоящими из операторов и их помощников. Самая важная роль FPV-дронов на поле боя – это, конечно, работа в качестве переносчика взрывчатки в расположение врага. Желательно прямо в блиндаж или танковый люк. Боеприпас прикрепляют к дрону даже с помощью простого скотча и других подручных инструментов.

Функционал FPV-дронов:

- камикадзе – уничтожаются при попадании в цель;
- сборы – сбрасывают с них боеприпасы и возвращаются на место вылета;
- дистанционное минирование – подлетают в необходимое место и сбрасывают мины.

Это зависит от возможностей конкретной модели и боевых задач. Обычно пилот последовательно запускает несколько устройств, чтобы вероятность успеха была выше. Это обеспечивает большую эффективность применения и ситуационную осведомленность операторов. Для этой цели дорогостоящие DJI и Autel не подходят. Например, пускать в один конец DJI FPV Combo ценой от 150 тысяч рублей можно только по самым важным целям. Поэтому приходится собирать кастомные FPV-дроны, стоимостью, не превышающей 30–50 тыс. рублей.

Одним из больших преимуществ FPV-дронов является их цена и высокая точность применения. Лучшие модели стоят вдвое дешевле обычного квадрокоптера Mavic. Например, беспилотник стоимостью до 1 000 долларов способен нести заряд, который в случае ус-

пешного попадания может поразить и даже полностью уничтожить БМП или танк противника стоимостью в несколько миллионов.

Появление FPV-дронов на фронтах СВО, которые выполняют различные боевые задачи, привело к развитию этого сегмента беспилотных летательных аппаратов, которые могут поражать технику и живую силу, как в качестве беспилотников-камикадзе, так и многоразовых беспилотных летательных аппаратов с механизмом сброса боеприпасов на цель.

Они представляют большую опасность и заставляют военных искать новые подходы в тактике использования подразделений на поле боя, новые методы защиты военной техники и разработку малогабаритных средств РЭБ для защиты отдельной единицы техники или окопа от поражения беспилотниками типа FPV [3].

IV. ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ FPV-ДРОНОВ НА СВО

Перехват видео трансляции. В большинстве FPV-систем используется аналоговый видеосигнал стандарта NTSC или PAL. Сравнивая с аналоговым телевещанием, которое, к слову, уходит в прошлое, смотреть видео может любой абонент, установив у себя дома антенну и телевизор. Также и противник может вычленить ваш видеоканал и настроить на него свой приемник. В результате он будет получать видео, которое видит оператор дрона. Помешать он не сможет, но будет предупрежден о месте работе дрона и не покинет укрытия. Для решения этой проблемы сейчас разрабатываются видео передатчики FPV с системой шифрования видео.

Слабым местом таких дронов называют каналы связи. При проблемах с управлением или передачей видео устройство теряется. В FPV-дронах используются различные протоколы радиосвязи для управления моделями и передачи видеосигнала. В частности это работа РЭБ (радиоэлектронная борьба). Противодействие FPV-дронам заключается в глушении (подавлении) частот (полос частот), которые используются БПЛА. Конкретно в FPV-дронах используется два канала связи – управление и видео. Глушится канал управления, так как воздействие должно идти на приемник. Дрон должен потерять связь с пультом управления и упасть. Воздействовать на приемник видеосигнала сложнее, потому что он находится у оператора дрона, а это значительное расстояние. Излучаемый передатчиком дрона видеосигнал бесполезен для подавления, но он используется для обнаружения в дрон-детекторах. Некоторые дрон-детекторы даже показывают рабочую частоту видеопредатчика. В РЭБ также используются методы глушения и подмены сигналов спутниковых навигационных систем GPS/GLONASS, но для FPV-дронов такие методы борьбы не используются, так они не имеют модулей спутниковой навигации [6].

Система опознавания «свой-чужой». Зачастую одни и те же модели часто применяются обеими сторонами конфликта, что затрудняет их визуальную идентификацию. Часто происходит, что, не разобравшись системы ПВС сбивают свои дроны. Сама система «свой-чужой» включающая получение индивидуальными навигационными средствами всех объектов, объединенных в локальную информационно-управляющую систему, информации о собственных координатах и ее передачу вместе со своим

персональным идентификационным номером в закодированном виде, отличающийся тем, что передачу информации о собственных координатах вместе со своим персональным идентификационным номером в закодированном виде осуществляют в ответ на получение закодированного сигнала запроса, причем в сигнал запроса включают информацию о координатах точки, по которой предполагают нанести удар, объекты, принявшие сигнал запроса, информацию о координатах точки нанесения удара сравнивают с собственными координатами, а ответный сигнал передают в том случае, если их собственные координаты совпадают с координатами точки нанесения удара с заранее установленной погрешностью [7].

Одним из недостатков FPV-дронов является их ограниченная дальность полета. Эта дальность ограничивается как ёмкостью аккумулятора, так и необходимостью передачи видеосигнала с дрона на очки пилота. Обычно FPV-дроны могут летать на расстояние до 8–10 км и находиться в воздухе около 10 минут. Однако важно отметить, что разные модели FPV-дронов могут иметь разные параметры в зависимости от целей и задач, для которых они предназначены.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено строение FPV-дрона с описанием комплектующих, рассмотрены технические характеристики. Выявлены слабые места при применении их в рамках специальной военной операции в виде средства уничтожения вражеских сил.

В настоящее время наша команда разработкой системы «свой-чужой» применимой в fpv-дронам, во избежание потери оборудования, техники и человеческого капитала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалёв М.А., Овакимян Д.Н. Беспилотные летательные аппараты вертикального взлета: сборка, настройка и программирование: учебное пособие. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2023. – 96 с.
2. Беспилотники двойного назначения: что такое FPV-дроны и зачем они нужны [Электронный ресурс]. – 2023. – <https://rg.ru/2023/09/12/fpv-drony-chto-takoe-i-zachem-nuzhny.html> (дата доступа: 22.03.2024).
3. Открытие спецоперации: FPV-дроны [Электронный ресурс]. – 2023. – <https://topwar.ru/213612-otkrytija-specoperacii-fpv-drony.html> (дата доступа: 26.08.2024).
4. Kostoglotov A.A., Galdin E.V., Pachin A.R., Mikhailov G.G., Napalkin M.Y. Engineering Technologies for the Design of Unmanned Aerial Vehicles (Uavs) for Various Industries of the Agricultural Sector, Civil Engineering and Logistics // Proceedings - 2024 4th International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education, TELE 2024. – 2024. – Р. 192-197.
5. Першин И.М., Носова В.А., Цаплева В.В. Самонастраивающиеся распределенные системы управления // Современная наука и инновации. – 2023. – № 1 (41). – С. 15-28.
6. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Воениздат, 1981. – С. 132-140.
7. Жуков В.М., Жуков М.В. Система опознавания подвижных объектов // Патент RU 2254596, ОАО "Уральское проектно-конструкторское бюро "Деталь" (RU) [Электронный ресурс] https://patents.s3.yandex.net/RU2254596C2_20050620.pdf (дата доступа: 21.08.2024).

Секция VII

**ИНФОРМАЦИОННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

DOI: 10.18522/syssyn-2024-66

**Повышение кибербезопасности с помощью
искусственного интеллекта**

Добриков Юрий Сергеевич
ВАГШ ВС РФ
Москва, Россия
grantapilot@gmail.com

Котов Дмитрий Васильевич
ВАГШ ВС РФ
Москва, Россия
dim.kot2009@yandex.ru

Лебедев Олег Борисович
ВАГШ ВС РФ
Москва, Россия
lebedev.ob@mail.ru

Аннотация. Искусственный интеллект и машинное обучение являются областями компьютерной науки, которые все шире используются для создания систем поддержки принятия решений, способных обрабатывать и анализировать информацию таким же образом, как это делает человек. Ключевой идеей функционирования систем машинного обучения является то, что они способны самостоятельно обучаться, анализируя большие объемы опытных данных, а затем использовать полученные знания для принятия решений в новых ситуациях. При этом системы машинного обучения часто подвергаются компьютерным атакам, которые могут приводить к нарушению безопасности и надежности функционирования целевых систем. Поэтому защита систем машинного обучения от атак становится в настоящее время одной из важнейших задач в области информационной безопасности.

Abstract. Artificial intelligence and machine learning are areas of computer science that are increasingly being used to create decision support systems that can process and analyze information in the same way that humans do. The key idea behind the operation of machine learning systems is that they are able to learn independently by analyzing large volumes of experimental data, and then use the acquired knowledge to make decisions in new situations. At the same time, machine learning systems are often subject to computer attacks, which can lead to a violation of the security and reliability of the target systems. Therefore, protecting machine learning systems from attacks is now becoming one of the most important tasks in the field of information security.

Ключевые слова: искусственный интеллект, кибербезопасность, методы противодействия, методы искусственного интеллекта.

Keywords: *artificial intelligence, cybersecurity, counteraction methods, artificial intelligence methods.*

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время искусственный интеллект (ИИ) стал жизнеспособным подходом к обработке огромных объемов разнородных данных и выполнению фундаментальных задач кибербезопасности, таких как обнаружение вторжений, управление уязвимостями и оценка безопасности, мониторинг безопасности, приоритизация активов, распределенный контроль доступа. С другой стороны, злоумышленники постоянно меняют и совершенствуют стратегии и методы атак, уделяя особое внимание использованию методов ИИ. При этом по-прежнему неясно, как защититься от использования ИИ в качестве вредоносного инструмента. Киберпреступники смогут реализовывать целевые атаки с беспрецедентной скоростью и масштабом применения, избегая при этом традиционных механизмов обнаружения, основанных на правилах, благодаря так называемому «наступательному ИИ» [1]. В связи с этим современное состояние использования ИИ в кибербезопасности (как со стороны защиты, так и атак) позволяет предположить, что потенциал ИИ для обучения и адаптации откроет новую эру масштабируемых, индивидуальных и человекоподобных атак [1, 2].

II. ИННОВАЦИИ В ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ

На сегодняшний день инновации ИИ отражают приоритеты в четырех основных категориях:

- ИИ, ориентированный на данные ИИ;
- модельно-ориентированный ИИ;
- ИИ, ориентированный на приложения;
- ИИ, ориентированный на человека.

Рассмотрим каждую категорию более подробно.

ИИ, ориентированный на данные [3, 4]. Сообщество ИИ традиционно фокусировалось на улучшении результатов решений ИИ путем настройки самих моделей ИИ, но ИИ, ориентированный на данные, позволяет сместить акцент на улучшение и обогащение данных, используемых для обучения алгоритмов. Инновации в области ИИ, ориентированного на данные, включают синтетические данные, графы знаний, разметку данных и аннотации. Синтетические данные, например, представляют собой класс данных, которые генерируются искусственно, а не получаются из прямых наблюдений за реальным миром. Следует отметить, что данные могут быть получены с использованием различных методов, таких как:

- статистически строгая выборка из реальных данных;
- семантические подходы и генеративные состязательные сети;
- путем создания сценариев моделирования, в которых модели и процессы взаимодействуют для создания совершенно новых наборов данных о событиях.

При этом предполагается массовое увеличение внедрения синтетических данных, т.к. это позволяет избежать использования конфиденциальной информации при машинном обучении ML-моделей за счет синтетических вариаций данных или синтетической замены частей данных, а также снижает стоимость и экономит время в ML-разработках, поскольку получить такие данные дешевле и быстрее. Кроме того, внедрения синтетических данных позволяет повысить производительность машинного обучения (ML), поскольку, если не рассматривать проблему переобучения, чем больше обучающих данных, тем лучше результаты обучения.

В модельно-ориентированном ИИ [5] по-прежнему требуется особое внимание, при построении моделей ИИ для последующего перехода от них к более эффективным действиям. Инновации состоят в том, что в данную категорию включены основанный на физике процессов и объектов ИИ, композитный ИИ, каузальный ИИ, генеративный ИИ, базовые модели и глубокое обучение [3–5].

Композитный ИИ – это сочетание различных методов ИИ для повышения эффективности обучения и расширения уровня представления знаний [6]. Каузальный ИИ включает различные методы, такие как каузальные графы и моделирование, которые помогают выявить причинно-следственные связи для повышения эффективности процесса принятия решений [7]. Преимущества каузального ИИ включают:

- повышение эффективности за счет добавления знаний в предметной области для запуска причинно-следственных моделей ИИ с меньшими наборами данных;
- расширение возможностей принятия решений и автономности в системах ИИ;
- улучшение объяснимости за счет фиксации причинно-следственных связей, которые легко интерпретировать;
- повышение надежности и адаптивности за счет использования причинно-следственных связей, которые соблюдаются в изменяющихся условиях.

Ориентированный на приложения ИИ [4,5]. Инновации состоят в том, что в данную категорию включены инженеринг ИИ, аналитика принятия решений, операционные системы ИИ, модельные операции, облачные сервисы ИИ, интеллектуальные роботы, обработка естественного языка (NLP), автономные транспортные средства, интеллектуальные приложения и компьютерное зрение.

Аналитика принятия решений – это практическая дисциплина, используемая для улучшения процесса принятия решений путем четкого понимания и проектирования того, как принимаются решения и как результаты оцениваются, управляются и улучшаются с помощью обратной связи [8]. Пограничный ИИ относится к использованию методов ИИ, встроенных в конечные точки Интернета вещей (IoT), шлюзы и пограничные серверы, в приложениях, начиная от автономных транспортных средств и заканчивая потоковой аналитикой [9]. Например, преимущества для бизнеса заключаются в:

- повышении операционной эффективности, в т.ч. разработка систем визуального контроля;
- расширенном клиентском опыте;
- уменьшении задержки в принятии решений на основе использования локальной аналитики;
- снижении затрат на подключение за счет меньшего трафика данных между периферией и облаком;
- постоянной доступности решений, независимо от подключения к сети.

Ориентированный на человека ИИ [3, 4]. Эта группа инноваций включает управление доверием ИИ, рисками и безопасностью, ответственный ИИ, цифровую этику, а также наборы для создания и обучения ИИ. Ответственный ИИ – это общий термин для аспектов принятия надлежащих деловых и этических решений при внедрении ИИ, включая ценность для бизнеса и общества, риск, доверие, прозрачность, справедливость, устранение предвзятости, объяснимость, подотчетность, безопасность, конфиденциальность и соответствие нормативным требованиям [5, 7–9].

Цифровая этика – включает в себя системы ценностей и моральных принципов для проведения электронных взаимодействий между людьми, организациями и вещами. Эти вопросы, особенно связанные с неприкосновенностью частной жизни и предвзятостью, по-прежнему волнуют многих. Люди, все больше осознающие, что их информация ценна, разочарованы отсутствием прозрачности, неправомерным использованием и взломом.

Доверенный ИИ – это одна из ведущих концепций в области этического ИИ, появившейся сравнительно недавно. Концепция доверенного ИИ задокументирована в Руководстве по этике для надежного ИИ [10] Европейской комиссии. Согласно этому документу доверенный ИИ должен обладать следующими основными характеристиками:

- легитимный – в соответствии с действующим законодательством;
- этический – соответствующий этическим принципам и ценностям;

- робастный – технически надежный и разработанный с учетом текущего социального контекста.

В Российской Федерации проблемы стандартизации систем искусственного интеллекта (СИИ), в том числе и защиты СИИ, решаются в Техническом комитете ТК 164 при Госстандарте РФ. При этом уже введено пять таких стандартов [3–5, 11]:

- ГОСТ Р 59276–2020 «Системы ИИ. Способы обеспечения доверия. Общие положения».
- ГОСТ Р 59278–2020 «Информационная поддержка жизненного цикла изделий. Интерактивные электронные технические руководства с применением технологий ИИ и дополненной реальности. Общие сведения».
- ГОСТ Р 59277–2020 «Системы ИИ. Классификация систем ИИ».
- ГОСТ Р 59237–2020 «Платформа «Автодата». Термины и определения».
- ГОСТ Р 59236–2020 «Платформа «Автодата». Общие положения».

III. ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КИБЕРАТАК

Компьютерное зрение направлено на воссоздание компонентов сложной системы зрения человека, что дает возможность компьютерам распознавать и анализировать объекты на изображениях и видео так же, как это делают люди [2].

Объем применения компьютерного зрения в мире постоянно увеличивается. Инновационная технология компьютерного зрения изменяет нашу повседневную жизнь и автоматизирует множество процессов. С увеличением вычислительной мощности улучшается точность распознавания, что способствует разработке более сложных систем на основе этой технологии [5].

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» от 10.10.2019 г. организации должны активно внедрять технологии ИИ, а также развивать партнёрство с научными коллективами для эффективного использования данных. Кроме того, в приоритетном порядке необходимо развивать стандарты открытых данных для привлечения научного сообщества к решению поставленных актуальных задач. Однако при использовании СИИ необходимо учитывать взаимовлияние ИИ и кибербезопасности, т.к. компьютерная преступность также эволюционирует в сторону ИИ [11]. Злоумышленники часто используют возможности ИИ для кибератак. Кибератаки широко распространены и часто рассматриваются как один из самых значимых рисков, с которыми сегодня сталкивается мир [5, 8–10]. Киберпреступники учатся использовать технологии ИИ, в первую очередь, машинного обучения, в своих интересах и превращают их в оружие, автоматизируя процесс реализации атаки. Технологические разработки открывают перед киберпреступниками новые возможности для совершения преступлений благодаря «анонимности» киберпреступной деятельности, отсутствию географических границ, менее выраженным правовым ограничениям, удобству технологий [11].

Основные этапы атак: поиск потенциальных жертв, компрометация, распространение и координированное управление представлены в табл. 1.

1. Повышение уровня автоматизации и скорости компрометации средств нападения.	<ul style="list-style-type: none"> • Ранее уязвимости эксплуатировались после завершения широкомасштабного сканирования. Теперь средства атаки используют уязвимости как часть сканирования, что увеличивает скорость распространения. • Средства нападения могут сами инициировать новые циклы атак. • инструменты распределенных атак способны более эффективно запускать DDoS-атаки, сканировать потенциальные жертвы и компрометировать уязвимые системы. Функции координации используют легкодоступные общедоступные протоколы связи.
2. Использование уязвимостей глобальной политики безопасности в Интернете.	<ul style="list-style-type: none"> • Один злоумышленник может относительно легко использовать большое количество распределенных систем для проведения разрушительных атак. • Инфраструктурные атаки (DoS, черви, DNS и атаки на маршрутизаторы). Повышение сложности инструментов атаки (сложнее обнаружить атаки). • Анти-форензика. Анализ часто включает лабораторные испытания и обратный инжиниринг. • Динамическое поведение (на основе случайного выбора, предопределенных путей принятия решений или прямого управления злоумышленниками).
3. Увеличение скорости обнаружения уязвимостей.	<ul style="list-style-type: none"> • Злоумышленники могут обнаружить новые уязвимости до того, как поставщики смогут их исправить. Время на исправление становится все меньше.
4. По степени информированности атакующего:	<ul style="list-style-type: none"> • стратегия «белого ящика» атакующему известны как входные данные, так и алгоритм, функции, параметры (полное или почти полное знание); • стратегия «серого ящика»: могут быть известны входные данные или алгоритм (частичное знание); • стратегия «черного ящика»: атакующему неизвестно ничего (доступ максимум ко входу и / или выходу обученной модели).
5. По специфике проведения:	<ul style="list-style-type: none"> • атаки с нарушением политики безопасности системы ИИ; • (влияющие на компоненты системы); • атаки без нарушения политики безопасности системы ИИ – Adversarial attack (влияющие на поступающие данные до попадания в систему).
6. По времени проведения атаки:	<ul style="list-style-type: none"> • в процессе обучения модели (например, отправляющие); • в процессе тестирования модели (например, искажающие); • в процессе использования (например, исследовательские, сознательные).
7. По способу воздействия:	<ul style="list-style-type: none"> • casualные – оказывающие непосредственное влияние на систему ИИ или ее поведение; • исследовательские – не оказывающие влияния на систему ИИ.
8. По специфике результата:	<ul style="list-style-type: none"> • таргетированные – приведение ответа к определенному виду/значению; • массовые – приведение ответа к любому виду/значению, кроме верного.

Новые технологии кибератак основаны на сочетании возможностей классических вирусов и сетевых червей с внедрением инструментов, реализующих атаки типа «распределенный отказ в обслуживании» (DDoS), рутки-

тов, ботнетов, методов социальной инженерии, веб- и сетевых технологий, методов ИИ, P2P-технологии, разведывательных агентов и т.д.

На сегодняшний день существуют десять наиболее распространенных, но постоянно развивающихся атак [4–7, 9–11].

1. Вредоносное ПО (Malware): шпионское ПО (spyware), вирусы (viruses), черви (worms).
2. Фишинг (Phishing): целевой фишинг (spear phishing), китобойный промысел (whaling), фарминг (pharming).
3. Программы-вымогатели (Ransomware).
4. Отказ в обслуживании (Denial-of-Service, DoS): TCP SYN-флуд-атаки, teardrop-атаки, smurf-атаки, ping-of-death-атаки, ботнеты.
5. SQL-инъекции (SQL Injections).
6. Экспloit нулевого дня (Zero-day exploit).
7. Парольные атаки (Password attacks).
8. Межсайтовый скрипting (Cross-site scripting).
9. Человек посередине (Man-in-the-Middle, MitM).
10. Атаки Интернета вещей (Internet of Things (IoT) attacks).

Возможные атаки на системы, использующие ИИ представлены на рис. 1–5.

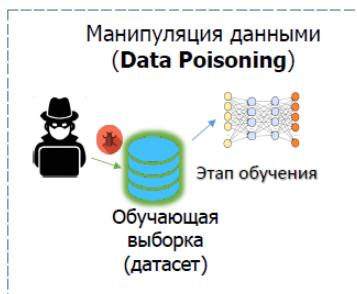


Рис. 1. Манипуляция данными



Рис. 2. Состязательные атаки

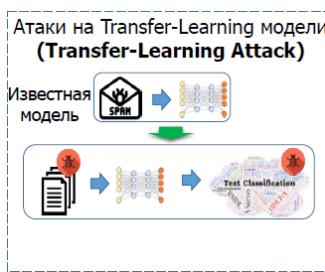


Рис. 3. Атаки на Transfer-Learning модели

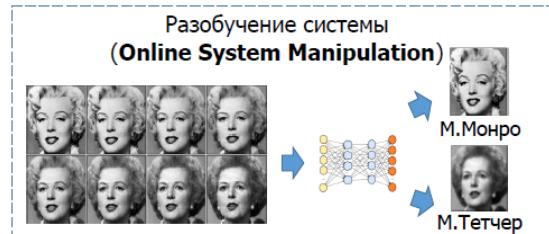


Рис. 4. Разобучение системы

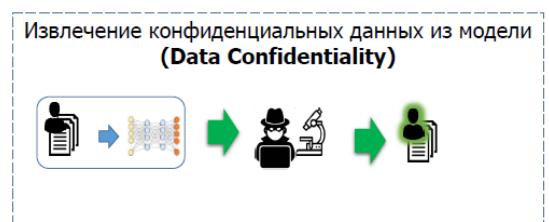


Рис. 5. Извлечение конфиденциальных данных

Методы противодействия данным атакам приведены в табл. 2.

Методы противодействия	
Метод противодействия	Объяснение действия
Состязательное обучение	Добавление состязательных примеров в обучающую выборку. Недостаток: время на обучение модели возрастает многократно.
Гауссовское зашумление данных	Добавление состязательных примеров с гауссовским шумом в обучающую выборку.
Стгаживание меток	Стгаживание меток / классов. Регуляризация модели в задаче классификации, что делает ее более устойчивой к шумам.
Использование ансамблей моделей	Совокупность моделей сложнее обойти.
Сжатие признаков	Обнаружение состязательных примеров путем сравнения с результатами контрольной модели, обученной на ограниченном наборе признаков.

Задача информационной системы от кибератак – это гонка вооружений, которая по своей сути асимметрична и выгодна противнику [3, 6–8]. За последние два десятилетия подходы к смягчению этой асимметричной угрозы изменились со статической модели безопасности, которая пытается создать безотказные системы, на более динамичный и адаптивный взгляд на защиту (апостериорный подход), который предполагает, что сбои неизбежны, а ключ к выживанию при атаках лежит в пути устранения сбоев и их последствий. Следует отметить, что недавние улучшения в технологических областях, таких как сервис-ориентированные архитектуры, облачные вычисления, виртуализация и семантическое связывание, позволили создать более динамичные способы построения систем и управления ресурсами.

IV. ПОВЫШЕНИЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИИ

Для повышения кибербезопасности с помощью ИИ необходимо решение следующих задач: предотвращение атак; обнаружение атак; поиск шаблонов и закономерностей, соответствующих вторжениям; быстрый анализ и приоритизация угроз; корреляция событий безопасности; анализ накопленной информации для адаптации методов

обнаружения вторжения; проведение расследований; классификации и анализ угроз; обучение и моделирование систем кибербезопасности [3–5].

Для предупреждений об атаках также используются технологии ИИ (в частности, машинного обучения) связанные с:

- расстановкой приоритетов для предупреждений о потенциальных атаках;
- выявлением попыток взлома как части более крупных и длительных кампаний по взлому;
- обнаружением следов действий вредоносных программ, как внутри компьютера, так и в сети;
- идентификацией кибератак, в которых атакующий использует легальное ПО для выполнения атакующих действий (*Living off the Land* (LotL) атаки);
- определением автоматизированных подходов к ослаблению последствий атак, когда требуется быстрое реагирование. Например, на основе отключения сетевого подключения и блокировки устройства (в т.ч. для программ-вымогателей).

Как указывалось, выше, киберпреступники часто используют ИИ для кибератак [9]. Применение атак с использованием ИИ наиболее часто встречаются в следующих областях.

Прогнозирование – сделать некоторый прогноз на основе ранее наблюдаемых данных. Например, идентификация нажатий клавиш на смартфоне на основе движения (вибрации), предсказание чувствительных данных для пользователей социальных сетей, поиск уязвимостей программного обеспечения [7].

Генерация – создание контента с использованием ИИ. Например, фальсификация медиа-данных, подбор паролей, модификация трафика (*traffic-space attacks* – состязательные атаки на систему ML для анализа трафика (определения вторжений), дипфейки (для того, чтобы выдать себя за жертву, имитируя ее голос или лицо при совершении фишинговой атаки) [8].

Анализ или извлечение полезной информации из данных или модели. Например: определение реальных факторов для создания эффективных атак или скрытия вторжений. Если атакуемая модель недоступна, то такие эксперименты могут проводиться на ее теневой копии (экспериментальном стенде) [10].

Поиск – поиск информации или объектов для атаки по заданным критериям. Например: поиск (идентификация) человека по изображениям на нескольких взломанных камерах, поиск возможных инсайдеров по семантическому анализу публикаций в социальных сетях, аннотирование (реферирование, суммаризация) документов при сборе данных из открытых источников [11].

Принятие решения – разработка плана и координация операции (атаки). Например: использование роевого интеллекта для управления автономной сетью ботов, планирование оптимальных атак на сеть [11].

Атаками в данном случае называют именно специальное изменение данных или специальную подстановку данных, на которых система работает неверно (вообще не работает). В общем виде – это проблема устойчивости систем ML. Другое название атак на системы ML – состязательные атаки [2].

Состязательные примеры принято классифицировать по точке приложения враждебных усилий (этапу конвейера машинного обучения) и знаниям атакующего о системе (белый ящик, черный ящик). Также атаки бывают целевые (например, атакующий хочет добиться определенного результата от классификатора) и нецелевые (просто воспрепятствовать правильной работе классификатора). Модификацию входных данных (по факту, самый распространенный тип атаки) еще называют атаками уклонения. Кража (IP stealing) включает в себя получение сведений о модели (это нужно для организации атак) и так называемые инверсные атаки, которые направлены на восстановление лежащих в основе частных данных, использованных для обучения целевой системы [2].

Следует отметить, что в настоящее время заметно увеличивается использование ИИ и во вредоносных информационных операциях [1, 3]. Расширяются возможности по производству и распространению высококачественного аудиовизуального контента, называемого синтетическими медиа и дипфейками. Технологии ИИ для создания дипфейков теперь могут создавать контент, неотличимый от реальных людей, сцен и событий. Кроме того, ИИ для создания дипфейков может повысить эффективность операций социальной инженерии (программа выдает себя за некоторое реальное лицо) и убедить, например, конечных пользователей предоставить злоумышленникам доступ к системам и информации. Эти методы могут использоваться для создания правдоподобных заявлений мировых лидеров и командующих, для фабрикации убедительных операций под ложным флагом и создания фальшивых новостей. Злонамеренные субъекты называют реальные события «фальшивыми», а видео- и фото-доказательства называют фейком. Распространение синтетических СМИ, известное как «дивиденд лжеца», побуждает людей называть настоящие СМИ «фальшивыми» и создает правдоподобное отрицание их действий. При этом синтетические медиа и области их применения становятся все более изощренными, включая убедительное чередование дипфейков с реально происходящими событиями и синтез дипфейков в реальном времени. В связи с этим определение дипфейков становится весьма актуальной задачей, для решения которой необходимы методы и средства, направленные на разработку инновационных семантических технологий для анализа медиа [2–9].

В общем случае прогнозная аналитика может помочь облегчить автоматизированное принятие решений при решении таких задач кибербезопасности, как фильтрация спама, анализ уязвимостей, обнаружение вторжений и выработка контрмер. Несмотря на распространность и ясность этих задач, многие существующие методы часто не автоматизированы или изобилуют ложными срабатываниями. Перспективные методы прогнозной аналитики

включают глубокое байесовское прогнозирование, обнаружение всплесков, глубокое генеративное моделирование с временными ограничениями, нейронные сети на основе временных графов и другие. При этом каждый подход можно адаптировать, включив в него специфичные для предметной области руководства, данные, задачи и требования. К заинтересованным сторонам, которые могут извлечь выгоду из улучшенных прогнозов, относятся аналитики центров управления безопасностью и специалисты по анализу киберугроз, особенно те, кто работает на тактическом и оперативном уровнях в своей организации [4, 8].

Кроме того, знания, полученные в ходе аналитических процедур, могут использоваться для автоматической реализации соответствующих средств контроля безопасности. Примеры включают автоматическую сегментацию и реорганизацию сети, моделирование угроз, восстановление сетей после кибератак, а также автоматическую установку исправлений, исправление и смягчение последствий [7, 9–12]. Методы ИИ, поддерживающие эти задачи, включают в себя усовершенствованные интеллектуальные агенты, обучение с подкреплением, сети акторов-критиков, методы защиты на основе состязательного обучения и байесовские сети.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено современное состояние использования искусственного интеллекта в кибербезопасности в виде сопоставления методов и технологий нападения и защиты. Рассмотрены аспекты защиты от атак с использованием искусственного интеллекта, атаки с использованием искусственного интеллекта, защиты самих систем машинного обучения и использование искусственного интеллекта во вредоносных информационных операциях.

Проведен анализ данных, используемых для решения задач кибербезопасности, обобщены существующие области применения искусственного интеллекта для кибербезопасности. Рассмотрены исследования в области интеллектуального мониторинга кибербезопасности и обнаружения кибератак.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kotenko I., Saenko I., Lauta O., Kribel K., Vasiliev N. Attacks on artificial intelligence systems: classification, the threat model and the approach to protection // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry 2022». Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 566. – Springer, Cham. 2023. – P. 293–302.
2. Котенко И.В., Саенко И.Б., Ляута О.С., Васильев Н.А., Садовников В.Е. Подход к обнаружению атак на системы машинного обучения с использованием генеративно-состязательной сети // Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. – 2023. – С. 366–376.
3. Xu H., Ma Y., Liu H.C. et al. Adversarial Attacks and Defenses in Images, Graphs and Text: A Review // International Journal of Automation and Computing. – 2020. – Vol. 17. – P. 151–178.
4. Ren K., Zheng T., Qin Zh., Liu X. Adversarial Attacks and Defenses in Deep Learning // Engineering. – 2020. – Vol. 6. – P. 346–360.
5. Rosenberg I., Shabtai A., Elovici Y., Rokach L. Adversarial Machine Learning Attacks and Defense Methods in the Cyber Security Domain // ACM Computing Surveys. – 2021. – Vol. 54, No. 5. – 36 p.
6. Zhou Sh., Liu Ch., Ye D., Zhu T., Zhou W., Yu Ph.S. Adversarial Attacks and Defenses in Deep Learning: From a Perspective of Cybersecurity // ACM Computing Surveys. – 2022. – Vol. 55, No. 8. – 39 p.
7. Li Y., Cheng M., Hsieh Ch.-J., Lee Th. C.M. A Review of Adversarial Attack and Defense for Classification Methods // The American Statistician. – 2022. – Vol. 76, № 4. – P. 329–345.
8. Федорченко Е.В., Федорченко А.В., Новикова Е.С., Саенко И.Б. Оценивание защищенности информационных систем на основе графовой модели эксплойтов // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – № 3 (55). – С. 23–36.
9. Лебедев В.Б., Лебедев О.Б. Синтез разделяющих функций при распознавании образов с использованием композитной архитектуры многоагентной системы // Материалы X Международной научно-технической конференции «Технологии разработки информационных систем». – Таганрог: ЮФУ, 2020. – С. 194–200.
10. Котенко И.В., Левицун Д.А. Методы интеллектуального анализа системных событий для обнаружения многошаговых кибератак: использование методов машинного обучения // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2023. – № 3. – С. 3–16.
11. Zhang Y., Yang Q. A survey on multi-task learning // IEEE transactions on knowledge and data engineering. – 2022. – № 34. – P. 5586–5609.
12. Girdhar M., Hong J., Moore J. Cybersecurity of Autonomous Vehicles: A Systematic Literature Review of Adversarial Attacks and Defense Models // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. – 2023. – Vol. 4. – P. 417–437.

Методика обнаружения аномальной работы киберфизических систем

Басан Елена Сергеевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ebasan@sfedu.ru

Могильный Антон Богданович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
mogilnyy@sfedu.ru

Михайлова Василиса Дмитриевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vmihaylova@sfedu.ru

Басан Александр Сергеевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
asbasan@sfedu.ru

Аннотация. С расширением областей применения киберфизических систем растет количество приложений и аппаратных решений для них, одновременно из-за этого растет количество и разновидность атак на киберфизическкие системы. Концепция, лежащая в основе данной работы, – это, прежде всего анализ процессов, законов изменения параметров, законов теории управления и, соответственно, наборы сценариев, которые реализует киберфизическкая система. В случае использования методов машинного обучения задача может быть сведена к задаче кластеризации, в рамках которой интеллектуальный алгоритм обучается разделять множество значений анализируемых параметров на области допустимых и неприемлемых значений. Для этого, например, нейросетевую модель можно обучить без учителя на основе данных, полученных в обычном режиме работы киберфизической системы. Такой подход обычно требует меньших усилий из-за отсутствия необходимости сбора данных, содержащих аномалии, и предполагает, что значения параметров различаются в зависимости от режима работы (нормального или нестабильного). Мерой расхождения между фактическими данными и данными, полученными с помощью интеллектуального алгоритма, может быть среднеквадратическая или абсолютная ошибка, причем чем выше ошибка, тем менее похожи анализируемые данные на те, которые используются для обучения. Другими словами, изменение меры расхождения в большую сторону позволяет говорить о вероятном несоответствии поведения параметров системы физическим законам. В статье раскрыт предлагаемый метод, а также дана оценка методу.

Abstract. With the expansion of the areas of application of cyber-physical systems, the number of applications and hardware solutions for them is growing, and at the same time, because of this, the number and variety of attacks on cyber-physical systems are growing. The concept underlying this work is, first of all, processes, laws of changing parameters, parameters themselves, laws of control theory and, accordingly, sets of scenarios that a cyber-physical system implements. In the case of using machine learning methods, the problem can be reduced to a clustering problem, within which an intelligent algorithm is trained to divide the set of values of the ana-

lyzed parameters into areas of acceptable and unacceptable values. To do this, for example, a neural network model can be trained without a teacher based on data obtained during the normal operation of a cyber-physical system. This approach typically requires less effort because there is no need to collect data containing anomalies, and it assumes that parameter values vary depending on the operating mode (normal or unstable). A measure of the discrepancy between the actual data and the data obtained using an intelligent algorithm can be the mean square or absolute error, and the higher the error, the less similar the analyzed data is to those used for training. In other words, a change in the divergence measure upward allows us to speak about the probable discrepancy between the behavior of the system parameters and physical laws. The article reveals the proposed method and also evaluates the method.

Ключевые слова: нейронные сети, аномалии, киберфизические системы, атаки, навигационная система, классификация.

Keywords: neural networks, anomalies, cyber-physical systems, attacks, navigation system, classification.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема оценки стабильности работы киберфизических систем (КФС) как никогда актуальна, поскольку они стали неотъемлемой частью жизни человека [1]. Вместе с этим стоит упомянуть, что неблагоприятные условия среды, в которых эксплуатируется КФС, могут непосредственно оказывать влияние на эффективность ее работы, а порою и целостность и выживаемость системы [2]. Так, например, такие КФС как беспилотные автоматизированные системы (БАС), как правило, эксплуатируются в условиях недетерминированной среды, воздействующей на них, например, метеорологическими факторами [3]. Все это в совокупности требует интеграции в КФС систем оценки стабильности работы и выявления аномалий для своевременного реагирования, направленного на снижение рисков оказания деструктивного воздействия [4]. В свою очередь возможности такой интеграции ограничены реализацией

того или иного метода [5]. Проблема, на решение которой направленно данное исследование заключается в необходимости классификации атак и других типов деструктивного воздействия, в частности со стороны окружающей среды, на основе детектирования аномалий при отсутствии размеченных данных с шаблонами. Рассматриваемая проблема имеют высокую степень проработанности в научном сообществе. Изученные работы позволяют сделать вывод, что общепринятым способом решения задачи выявления аномалий посредством использования классификационных алгоритмов машинного обучения является использование различных нейросетевых архитектур, обученных с учителем на размеченных датасетах. В работе [6] рассматривается обнаружение GPS-спуфинг атак на основе применения RNN. Авторы строят модель нормального поведения в двух типах условий – городские и шоссе. В статье [7] предлагается модель защиты от спуфинга на основе линейной регрессии (LR) для БАС. Модель прогнозирования траектории полета БАС строится путем сопоставления журнала полета БАС с моделью LR, и точность прогнозирования относительно высока среди всех методов. Модель реализует валидацию статуса полета БАС в процессе миссии, но также реализует предотвращение спуфинга БАС, чтобы обеспечить плавное завершение полета. В статье [8] предлагается метод обнаружения аномалий для БАС, основанный на вейвлет-разложении и многоуровневом автокодировщике шумоподавления. Этот метод учитывает негативное влияние зашумленных данных и возможности извлечения признаков моделей глубокого обучения. Метод направлен на повышение точности обнаружения аномалий с помощью вейвлет-разложения и многоуровневого шумоподавления автоэнкодера. Обнаружение аномалий на основе данных о полете БАС является важным методом мониторинга состояния БАС и выявления потенциальных аномальных состояний, что является важным средством снижения риска летных происшествий с БАС. Авторы статьи [9] предлагают метод на основе многокритериального анализа. Чтобы фиксировать корреляцию данных многомерного зондирования и эффективно повышать точность обнаружения аномалий, используется GTAF, модель обнаружения аномалий для многомерных последовательностей, основанная на улучшенной графовой нейронной сети с преобразователем, механизмом внимания к графу и механизмом многоканального слияния. Данные механизмы будут представлены в этой статье. В статье [10] предлагается система обнаружения аномалий, основанная на реконструкции пространства ошибок, в которой генетические алгоритмы используются для оптимизации гиперпараметров методов машинного обучения. Предложенный метод достиг показателя F1 87,89% в наборе данных SWaT. В исследовании [11] предлагают подход к обнаружению аномалий путем интеграции интеллектуальной техники глубокого обучения, называемой сверточной нейронной сетью (CNN), с моделью гауссовой смеси (GMM) на основе фильтра Калмана (KF). Предложенная модель используется для выявления и обнаружения аномального поведения в КФС. Однако стоит сказать, что случай, при котором существует база размеченных данных, содержащих аномалии в работе КФС, близок к идеальному. Во-первых, для сбора наборов данных требуется либо подвергать риску деструктивного воздействия КФС, либо моделировать аномалии в данных.

Первый вариант потенциально может привести к не-предвиденным последствиям вплоть до уничтожения системы. Во втором же варианте критична правдоподобность созданной модели и того, с чем потенциально может столкнуться интеллектуальная система. Во-вторых, важным является корректность разметки данных. Это оказывает воздействие на процедуру сбора данных, поскольку требуется журналирование всех происходящих процессов, чтобы с определенной степенью точности причислить тот или иной фрагмент датасета к определенному классу. При этом чем меньше точность разметки, тем соответственно будет ниже точность обучаемого интеллектуального алгоритма.

Таким образом, решаемой в работе задачей является реализация конвейера проектирования моделей детектирования аномалий в работе КФС на основе применения нейронных сетей, обученных без учителя.

II. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ

Решением проблем разметки и сбора специфических данных является изменение подхода. В большинстве случаев значительно проще производится сбор данных о работе системы в нормальном режиме, когда внешнее или внутреннее влияние отсутствует. При этом риски утери КФС минимальны, а моделирование аномалий не требуется. Вместе с этим собранные данные позволяют впоследствии произвести разделение между аномальным и нормальным поведением КФС. Так как обучающие данные были собраны в режиме нормальной работы, то при определенном уровне разницы между данными можно судить о наличии аномалий данных, то есть о возможном деструктивном воздействии на КФС. Эффективность разрабатываемых методов оценки стабильности работы КФС зависит в том числе от природы возникновения потенциальных факторов, влияние которых негативным образом воздействует на систему.

Рассмотрим модель атак и другие типы деструктивного воздействия на КФС. Ранее авторами работ проводилось исследование, которое связывало параметры КФС, процессы, подсистемы и атаки [12]. Рассмотрим типы подсистем и их комбинации в сочетании с воздействиями, которые оказывают на них атаки и типы разрушающего воздействия, в табл. 1. При этом важно понимать, как злоумышленник реализует атаку. В случае с Асинхронной атакой подделки злоумышленник сначала посылает достаточно мощный сигнал для того, чтобы сначала отключить жертву от легитимных спутниковых сигналов, а затем навязывает своей сигнал. Недостатком этой атаки для злоумышленника является то, что данную атаку достаточно легко обнаружить, так как отношение сигнал/шум приемника жертвы сильно увеличится, точность по глобальной системе позиционирования (GPS) снизиться и в момент отключения от легитимных спутников жертва может потерять крушение, так что дальнейший сценарий не сможет быть применен. Достоинство атаки для нарушителя в том, что она достаточно легко реализуема [13].

В случае с Синхронной атакой злоумышленнику нужно сконструировать сигнал похожий на легитимный сигнал спутника, чтобы плавно перестроить приемник жертвы на свой, для этого ему необходимо подделать следующие параметры: $t_i(t)$ задержка кода, $\phi_i(t)$ несущая

частота, D_i бит данных или ложные сигнальные сообщения. При этом данную атаку достаточно сложно зафиксировать, так как устройство медленно меняет свою траекторию под воздействием нарушителя. Тем не менее данная атака сложно реализуема, потому что злоумышленнику необходима длительная подготовка, чтобы получить параметры истинного сигнала, а затем мягкая подделка, лучше использовать несколько устройств одновременно [14].

При реализации атаки Повтора нарушитель просто перехватывает сигнал, а потом повторяет его с большей мощностью. Данная атака будет способствовать временной задержке и может повлиять на скорость перемещения устройства, кроме того, может быть оказано влияние на синхронизацию устройств, если они будут работать в группе. При этом быстрого воздействия может и не произойти. Такой атаке рассинхронизации в основном подвержены умные электростанции [15].

При реализации атаки Глушения глобальной навигационной системы (ГНС) злоумышленник полностью отключает сигналы легитимных спутников. При этом отличаем от Асинхронной атаки отношение сигнал/шум снижается, потому что цель злоумышленника в данной атаке не превзойти сигнал спутников и навязать собственный, а полностью отключить жертву от каких-либо сигналов, поэтому у приемника жертвы остается только шум и нет полезных сигналов. Таким образом, при реализации данной атаки злоумышленник добивается прекращения функционирования жертвы [16, 17].

ТАБЛИЦА 1. РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Подсистема	Среда	Атака
Навигация		
Сигнал ГНС	8-10 баллов облачность, городской район, горный ландшафт	Синхронный, Асинхронный, Повтор, Глушение ГНС
Несколько ГНС	8-10 баллов облачность, городской район, горный ландшафт	Асинхронный, Глушение ГНС
Компьютерное зрение (КЗ)	8-10 баллов облачность, порывы ветра, леса, городская местность, горный ландшафт	-
Инерциальная навигационная система (ИНС) и ГНС	Порывы ветра	Глушение ГНС
ИНС и ГНС и КЗ	8-10 баллов облачность, порывы ветра, леса, городская местность, горный ландшафт	-
Система связи		
Один радиоканал	Городской район, горный ландшафт	Управление/Телем./Видео Спуфинг, Телеметрический канал, Помехи видеоканала
Несколько каналов связи на одной частоте	Городской район, горный ландшафт	Управление/Телем./Видео Спуфинг, Телеметрический канал, Помехи видеоканала

Несколько каналов связи на разных радиочастотах	Горный ландшафт	Управление/Телем./Видео Подмена
Система контроля		
Автономная система управления	Облачность, порывы ветра, естественное затухание сигнала	Синхронный, Асинхронный, Повтор, Глушение ГНС
Система дистанционного управления	Облачность, порывы ветра, естественное затухание сигнала	Управление/Телем./Видео Спуфинг, Телеметрический канал, Подавление видеоканала

Исходя из описанных сценариев, которые детально рассматриваются в данной работе, можно сделать вывод о том, что для построения корректного вектора атаки нужно анализировать с одной стороны параметры, которые злоумышленнику нужно воспроизвести или подделать, а с другой стороны, параметры на которые воздействует атака [18–20].

Помимо этого, так как КФС создаются для выполнения определенных задач, то информация о выполняемом задании прямым образом воздействует на изменение большинства параметров системы. Однако не всегда возможно получение подробной информации о выполняемом задании и степени его влияния на рассматриваемый набор параметров КФС. Вместе с этим могут возникать ситуации, при которых анализ сырых данных невозможен ввиду ряда причин таких как, например, чрезмерная адаптация модели к определенным числовым интервалам, при которой она неспособна к работе с неизвестными данными, фактически являющимися приемлемыми с точки зрения стабильности. В совокупности вышесказанное вызывает необходимость в предобработке сырых данных. Для этого между двумя измерениями I_1, I_2 , полученные в моменты времени t_1, t_2 соответственно возможно вычислять расстояние Евклида (что и будет входными данными для модели), описываемое следующей формулой:

$$l(I_1, I_2) = \|I_1 - I_2\| = \sqrt{\sum_{j=0}^n (I_{1j} - I_{2j})^2}. \quad (1)$$

В качестве меры различия могут быть использованы функции, например, среднеквадратическая ошибка между ожидаемыми и предсказанными моделью значениями, которая описывается следующей формулой:

$$MSE(y, \hat{y}) = 1/n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (2)$$

где y – вектора наблюдений, \hat{y} – вектора предсказаний, n – количество векторов.

Для классификации же предлагается использовать порог ошибки, превышение которого относит анализируемое состояние системы к нестабильному. Порог ошибки возможно получить посредством вычисления квантиля. Для этого после набора ошибок между измеренными и предсказанными данными из обучающего набора рассматривается как распределение случайной величины, и определяется значение, которое изучаемая величина не превышает с вероятностью 0.99. Порог

вероятности определен ввиду допущения, что в обучающих данных могут присутствовать незначительные выбросы, выбирающиеся из основной закономерности ряда. Предлагаемый метод основывается на применении искусственных нейронных сетей. Поскольку КФС обладает множеством параметров, которые подходят для анализа, и при этом эти параметры могут иметь различную физическую интерпретацию, был выбран вариант, при котором существует множество моделей M , каждая из которых может быть соотнесена с определенным(и) исследуемыми параметрами системы из множества P . Так как КФС могут работать в автономном режиме, то все вычисления по оценке стабильности их работы должны происходить неотрывно от основной платформы. Иными словами, используемый алгоритм машинного обучения должен применяться на КФС. В совокупности это порождает ограничения по сложности вычислений используемого инструментария. Таким образом, для оценки ряда параметров на наличие аномалий в рамках вычислительных способностей КФС в качестве нейросетевой архитектуры выбран автокодировщик на основе полностью связанных слоев, состоящий из 103 настраиваемых параметров (рис. 1).



Рис. 1. Архитектура используемой нейросети.
Слева – непосредственно архитектура, справа – структура
полносвязанных блоков

Для предотвращения переобучения используются слои выброса, а также для ускорения обучения используется пакетная нормализация. В качестве функции активации скрытых слоев используется функция ReLU. Последний слой имеет размерность равную размерности входа в нейросеть и линейную функцию активации. Ввиду этого для обучения использовалась среднеквадратичная функция ошибки.

Таким образом, весь алгоритм работы описанного метода выглядит как представлено на рис. 2.

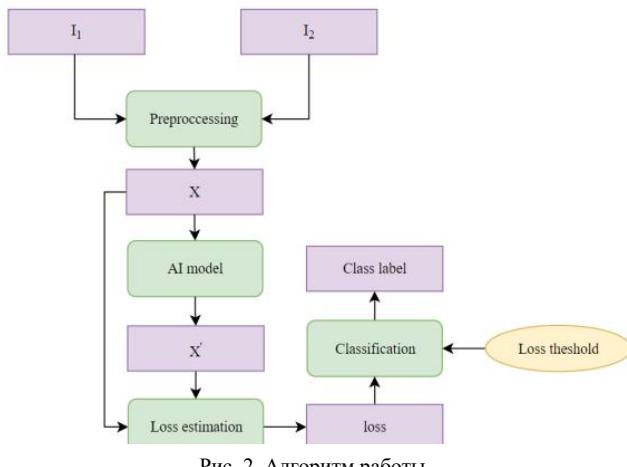


Рис. 2. Алгоритм работы

Классификация происходит на основе предварительного анализа и создания правил корреляции, которые позволяют определить, какие параметры срабатывают для разных типов атак. таким образом получаем комбинированный метод классификации. Далее оценивалась точность детектирования и классификации. Accuracy вычислялась по формуле:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} * 100\%, \quad (3)$$

где TP – количество объектов, определенных как истинно положительные, TN – количество объектов, определенных как истинно отрицательные, FP – количество объектов, определенных как ложно положительные, FN – количество объектов, определенных как ложно отрицательные. Precision вычислялась по формуле:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} * 100\% \quad (4)$$

Recall вычислялась по формуле:

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} * 100\% \quad (5)$$

F1-score вычислялась по формуле:

$$F1 = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} * 100\%. \quad (6)$$

III. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

В целях получения практических данных о работоспособности и иных характеристиках метода был произведен сбор данных о состоянии глобальной навигационной системы такой КФС как БАС. Сбор производился в различных условиях, в том числе и при наличии деструктивного воздействия, что позволяет определить эффективность метода в условиях реальных аномалий (табл. 2). Эти выборки были использованы для обучения 10 моделей, анализирующих 11 параметров, а именно: Широта и долгота, анализируемые совместно (gps_dist), Высота, полученная по барометру (vehicle_air_data_baro_alt_meter), Стандартное отклонение ошибки позиционирования в горизонтальной плоскости (vehicle_gps_position_eph), Стандартное отклонение ошибки позиционирования в вертикальной плоскости (vehicle_gps_position_epv), Снижение точности позиционирования в горизонтальной плоскости (vehicle_gps_position_hdop), Шум в канале (vehicle_gps_position_noise_per_ms), Количество используемых спутников для навигации (vehicle_gps_position_satellites_used), Снижение точности позиционирования в вертикальной плоскости (vehicle_gps_position_vdop), Высота над рельефом (vehicle_local_position_dist_bottom), Высота, полученная в локальной системе координат (vehicle_local_position_z).

ТАБЛИЦА 2. Сводная информация о собранных данных

Вид воздействия	Количество полетов	Всего пакетов данных
Отсутствует	31	36296
Аномалии GPS	30	16630
Асинхронная подмена	13	13622
Синхронная подмена	29	25298

В качестве функции ошибки использовалась среднеквадратичная ошибка (MSE), в качестве оптимизатора – SGD со скоростью обучения 0.01. Графики ошибки, полученные в результате обучения приведены на рис. 3.

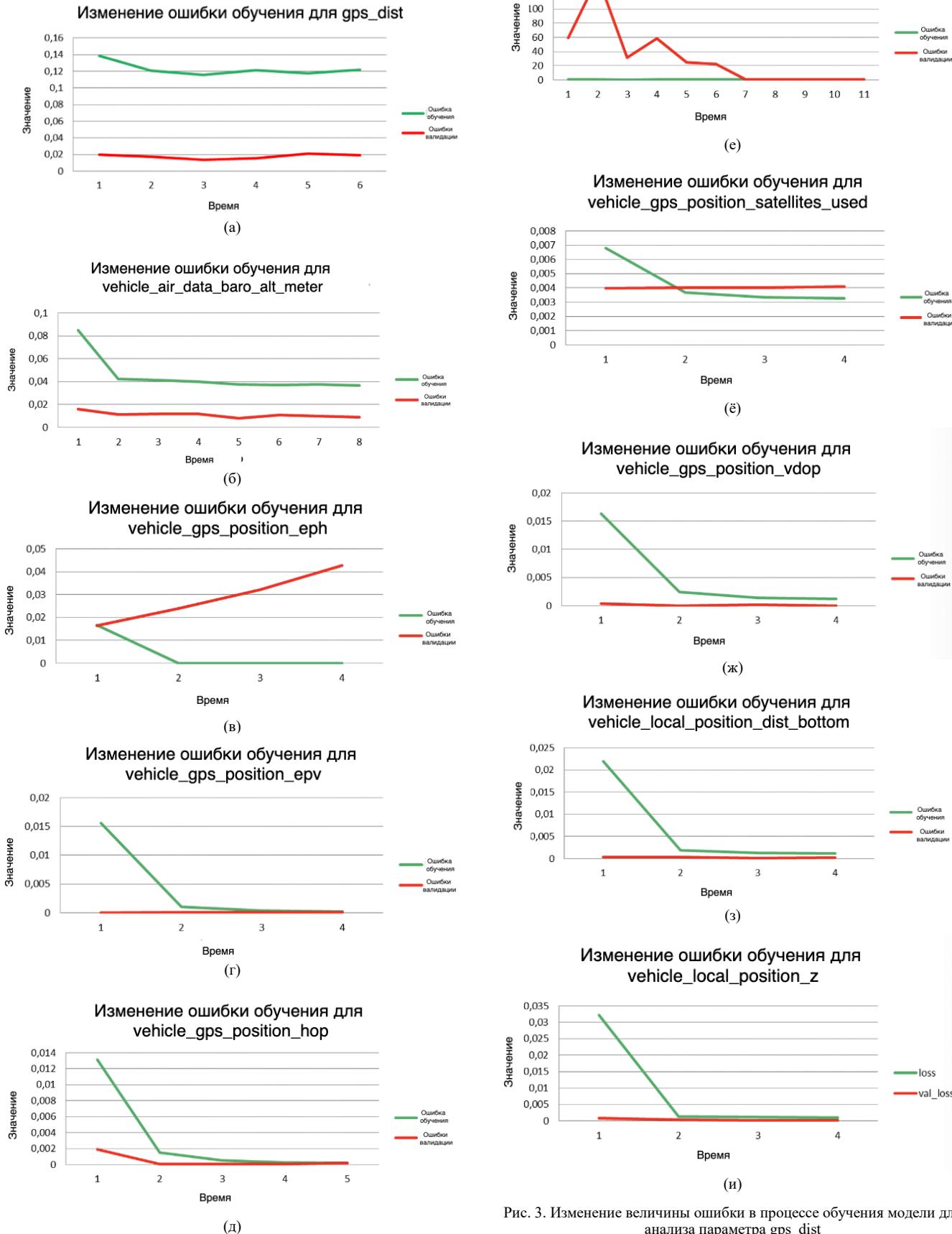


Рис. 3. Изменение величины ошибки в процессе обучения модели для анализа параметра `gps_dist`

После обучения было произведено вычисление порога превышения ошибки на обучающей выборке в целях бинарной классификации. Выбранные пороги представлены в табл. 3. Созданные модели были применены к 7 логам, собранным в режиме нормальной работы системы, из валидационной выборки и ко всем логам, в которых оказывалось деструктивное воздействие. Всего анализировалось 78 логов. Положительность прогноза по аномальности поведения системы определялась исходя из того, что хотя бы одна из моделей просигнализирует об аномалии поведения определенного параметра в рамках одной записи работы.

ТАБЛИЦА 3. ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ПОРОГИ ПРЕВЫШЕНИЯ ОШИБКИ

Параметр	Порог ошибки
gps_dist	0,777137352
vehicle_air_data_baro_alt_meter	0,386976558
vehicle_gps_position_eph	0,022308711
vehicle_gps_position_epv	0,043276258
vehicle_gps_position_hdop	0,158897377
vehicle_gps_position_noise_per_ms	12,08444334
vehicle_gps_position_satellites_used	0,989247176
vehicle_gps_position_vdop	0,185512103
vehicle_local_position_dist_bottom	0,047994099
vehicle_local_position_z	0,036910152

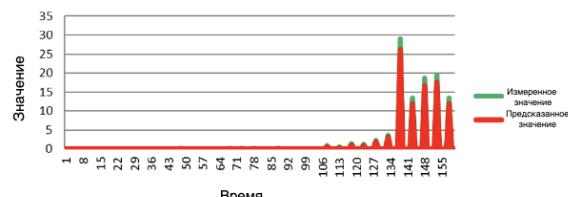
В случае, если ни одна из моделей не смогла детектировать аномалии, количество ложноположительных инкрементировалось. Результаты оценки представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. С ЗНАЧЕНИЕ МЕТРИК КАЧЕСТВА

Метрика	Значение
TN	0
TP	71
FP	7
FN	0
Accuracy	91.02%
Precision	91.02%
Recall	100%
F1-score	95.30%

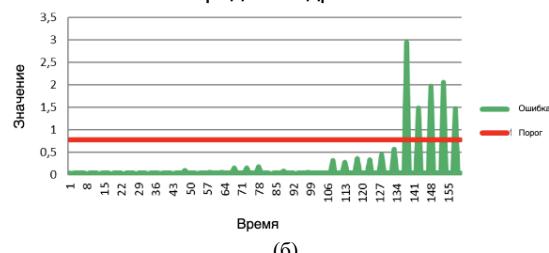
Метод показывает высокую точность порядка 91%. При этом из всего числа проанализированных записей аномальные были определены в 100% случаев. Появление поведения, отличного от нормального, детектируется моделью как аномальное, что можно видеть, к примеру, при анализе моделью широты и долготы при возникновении аномалий GPS (рис. 5). Резкое увеличение параметра влечет за собой и значительный рост ошибки предсказания, что объясняется несвойственному поведению системы в нормальном режиме работы. Однако количество ложноположительных срабатываний, относящихся к анализу записей нормальной работы, позволяет сделать вывод, что для обучения моделей требовалось большее разнообразие обучающей выборки, либо в валидационной выборке присутствовали аномалии.

Сравнение реального и прогнозируемого gps_dist



(а)

Увеличение среднеквадратичной ошибки



(б)

Рис. 4. (а) Сравнение между реальным и предсказанным изменением параметра системы (б) Изменение ошибки между действительным значением и предсказанным с учетом порога превышения

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, была создана система проектирования моделей для детектирования аномального поведения КФС. Система показывает высокую точность классификации на данных, полученных при оказании различных типов деструктивного воздействия. Перспективным направлением дальнейших работ является реализация метода многоклассовой классификации по определенному типу оказываемого воздействия, что повысит эффективность принятия контрмер по сокращению пагубного влияния на защищаемую систему. Вместе с этим требуется дополнительное исследование, направленное на подробное изучение оперируемых данных и повышение их чистоты, а также разнообразия, что должно сократить количество ложноположительных срабатываний и повысить точность классификации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Глава 1 и 2 выполнены при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации за счет средств стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов (Конкурс СП-2022) № СП-858.2022.5 по теме «Технология обеспечения кибербезопасности автоматизированных систем от активных информационных атак на основе принципа отражения», глава 3 и 4 выполнены при поддержке внутреннего гранта студенческим научным объединениям Южного федерального университета.

ЛИТЕРАТУРА

- Abdelkhalek M., Ravikumar G. and Govindarasu M. ML-based Anomaly Detection System for DER Communication in Smart Grid // Proceedings of 2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), New Orleans, LA, USA, (2022). – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ISGT50606.2022.9817481.
- Hao W., Yang T. and Yang Q. Hybrid Statistical-Machine Learning for Real-Time Anomaly Detection in Industrial Cyber-Physical Systems // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – Jan. 2023. – Vol. 20, No. 1. – P. 32-46. – DOI: 10.1109/TASE.2021.3073396.

3. *Gokarn V., Kulkarni V. and Singh P.* Enhancing cyber physical system security via anomaly detection using behaviour analysis // Proceedings of 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India, 2017. – P. 944-948. – DOI: 10.1109/WiSPNET.2017.8299901.
4. *Kim Y. and Kim H.K.* Anomaly Detection using Clustered Deep One-Class Classification // Proceedings of 2020 15th Asia Joint Conference on Information Security (AsiaJCIS), Taipei, Taiwan, 2020. – P. 151-157. – DOI: 10.1109/AsiaJCIS50894.2020.00034.
5. *Sun Z. and Li J.* Anomaly Detection for CPS via Memory-Augmented Reconstruction and Time Series Prediction // Proceedings of 2022 IEEE 19th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS), Denver, CO, USA, 2022. – P. 530-536. – DOI: 10.1109/MASS56207.2022.00080.
6. *Xiao K., Zhao J., He Y., Li C. and Cheng W.* Abnormal Behavior Detection Scheme of UAV Using Recurrent Neural Networks // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 110293-110305. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934188.
7. *Lianxiao M., Lin Y., Shuangyu R., Gaigai T., Long Z., Feng Y., Wu Y.* An Approach of Linear Regression-Based UAV GPS Spoofing Detection // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2021. – Vol. (2021), Article ID 5517500. – <https://doi.org/10.1155/2021/5517500>.
8. *Zhou S., He Z., Chen X., Chang W.* An Anomaly Detection Method for UAV Based on Wavelet Decomposition and Stacked Denoising Autoencoder // Aerospace. – 2024. – 11, 393. – <https://doi.org/10.3390/aerospace11050393>.
9. *Wang G., Ai J., Mo L., Yi X., Wu P., Wu X., Kong L.* Anomaly Detection for Data from Unmanned Systems via Improved Graph Neural Networks with Attention Mechanism // Drones. – 2023. – 7, 326. – <https://doi.org/10.3390/drones7050326>.
10. *Oliveira N., Sousa N., Oliveira J. and Praça I.* Anomaly Detection in Cyber-Physical Systems: Reconstruction of a Prediction Error Feature Space // Proceedings of 2021 14th International Conference on Security of Information and Networks (SIN), Edinburgh, United Kingdom, 2021. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/SIN54109.2021.9699339.
11. *Nagarajan S.M., Deverajan G.G., Bashir A.K., Mahapatra R.P., and Al-Numay M.S.* IADF-CPS: Intelligent anomaly detection framework towards cyber physical systems // Comput. Commun. – 2022. – Vol. 188. – P. 81-89. – DOI: 10.1016/j.comcom.2022.02.022.
12. *Basan E., Basan A., Nekrasov A., Basyuk A., Lesnikov A.* Trusted Operation of Cyber-Physical Processes Based on Assessment of the System's State and Operating Mode // Sensors. – 2023. – 23 (4), 1996. – DOI: 10.3390/s23041996.
13. *Gao Y., Lv Z. and Zhang L.* Asynchronous Lift-Off Spoofing on Satellite Navigation Receivers in the Signal Tracking Stage // IEEE Sensors Journal. – Vol. 20, No. 15. – P. 8604-8613, 1 Aug. 1, 2020. – DOI: 10.1109/JSEN.2020.2984525.
14. *Kamaruzzaman M.R.B., Fall D., Hossain M.D., Taenaka Y. and Kadobayashi Y.* Modulated Synchronous Taxiing: Mitigating Uncertainties Amid Ads-B Spoofing // Proceedings of 2022 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), Dulles, VA, USA, 2022. – P. 1-13. – DOI: 10.1109/ICNS54818.2022.9771477.
15. *Laverty D.M., Kelsey C. and O'Raw J.B.* GNSS Time Signal Spoofing Detector for Electrical Substations // IEEE Transactions on Smart Grid. – March 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 1468-1477. – DOI: 10.1109/TSG.2021.3122099.
16. Analysis of PX4 location estimation source code. [<https://programmersought.com/article/77068032562/>] (<https://programmersought.com/article/77068032562/>) (accessed March 26, 2024).
17. *Kovalev S., Shabelnikov A., Sukhanov A.* Dynamic programming for automatic positioning of wheel chocks on marshalling yards / In: Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Vasileva M., Sukhanov A. // Proceedings of the second international scientific conference “Intelligent information technologies for industry” 2018, Advances in intelligent systems and computing. – Vol. 680. – P. 119-127. – Springer, Cham, 2018.
18. *Basan E.S., Mikhailova V.D., Martynenko M.V.* Security Assessment of Technological Process for Smart Manufacturing // Proceedings - 2023 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023. – 2023. – P. 1010-1015.
19. *Mikhailova V.D., Shulika M.G., Basan E.S., and Peskova O.Y.* (2021, January 13-14). Security architecture for UAV. Proceedings of the 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Yekaterinburg, Russia. – DOI: 10.1109/USBEREIT51232.2021.9455039 EDN: DSQEHP.
20. *Михайлова В.Д., Шулика М.Г., Басан Е.С.* Архитектура безопасности для беспилотных летательных аппаратов // Перспективные системы и задачи управления: Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара, п. Нижний Архыз – п. Домбай, 05–09 апреля 2021 года. – Ростов-на-Дону: ИП Марук М.Р., 2021. – С. 31-39. – EDN NPGJWG.

Обеспечение защищенного удаленного администрирования информационных систем и объектов критической информационной инфраструктуры

Ермаков Александр Сергеевич

Пятигорский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»
Пятигорск, Россия
ermakov@cascad-kmv.ru

Аннотация. Вопросы реализации требований по организации защищенного канала управления информационными системами и объектов критической информационной инфраструктуры заложены в нормативно-методических документах ФСТЭК России, но в практической деятельности организаций либо полностью отказываются от возможности удаленной работы, либо эта работа реализуется с нарушениями требований безопасности информации. Статья посвящена обзору вариативных методов защиты дистанционного (удаленного) канала управления информационными системами и объектами критической информационной инфраструктуры с использованием внешних информационно-телекоммуникационных сетей.

Abstract. Issues of implementing the requirements for organizing a secure channel for managing information systems and critical information infrastructure facilities are laid down in the regulatory and methodological documents of the FSTEC of Russia, but in practical activities, organizations either completely refuse the possibility of remote work, or this work is implemented in violation of information security requirements. The article is devoted to a review of variable methods of protecting a remote channel for managing information systems and critical information infrastructure objects using external information and telecommunication networks.

Ключевые слова: удаленное администрирование, защищенные информационные системы, RDP, криптографическая защита информации.

Keywords: remote administration, secured information systems, RDP, cryptographic information protection.

I. ВВЕДЕНИЕ

Реализация удаленного доступа к информационным системам является легко выполнимой задачей системного администрирования. Для всех операционных систем имеются протоколы подключения к ним для реализации помощи в обслуживании информационной системы. Многие службы технической поддержки разработчиков программного обеспечения в случае невозможности решения пользовательского вопроса в телефонном режиме запрашивают удаленный доступ к рабочему месту и решают собственными силами без выезда к пользователю его проблемный вопрос.

Подобный вариант работы службы технической поддержки реализуем как для рядовых пользователей, так и для организаций, использующих специализированное программное обеспечение и действующую к нему техническую поддержку.

Также возможны варианты по организации системного администрирования общедоступного программного обеспечения информационных систем, как сотрудниками организаций, находящимися на удаленном режиме работы, так и сотрудниками дочерних организаций, филиалов или сторонними организациями по гражданско-правовому договору подряда.

В случае с открытыми информационными системами организаций вопрос обеспечения информационной безопасности канала удаленного управления решается организационными методами и любым набором средств защиты информации, удовлетворяющим все стороны информационного обмена. Требования в данном случае регламентированы только владельцем объектов информатизации и изложены в его внутренних организационно-распорядительных документах по информационной безопасности.

Когда же в информационной системе может обрабатываться конфиденциальная информация (в т.ч. персональные данные) или же он является объектом критической информационной инфраструктуры, необходимо рассматривать в первую очередь требования ФСТЭК России к возможности организации удаленного доступа для осуществления управлением программными средствами.

II. ТРЕБОВАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ЗАЩИЩЕННОГО УДАЛЕННОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ

Для каждого из типов объектов информатизации, в зависимости от его типа и степени конфиденциальности обрабатываемых ресурсов, существуют требования к обеспечению безопасности информации, реализованные в нормативно-методических документах ФСТЭК России и ФСБ России.

Для государственных информационных систем, а также систем, к которым применяются требования Приказа ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. №17 [1] согласно п.18.4 вышестоящего приказа должно осуществляться гарантийное и техническое обслуживание конфигурации информационной системы и ее системы защиты, в том числе дистанционное (удаленное). Базовая мера защиты информации УПД.13 Приказа №17 устанавливает для всех классов защищенности информационных систем обязательную реализацию защищенного удаленного доступа через внешние информационно-телекоммуникационные сети. Более детальные требования к реализации меры УПД.13 регламентированы в Методическом документе ФСТЭК России [2]. Согласно требованиям к усилению данной меры необходимо осуществлять:

- мониторинг удаленного доступа дополнительными программно-техническими средствами;
- использовать минимально возможное допустимое количество точек подключения;
- запретить осуществление администрирования от привилегированных учетных записей;
- использование сертифицированных ФСБ России криптографических средств защиты информации;

Информационные системы персональных данных в соответствие с Приказом ФСТЭК России от 18.02.2013 г. №21 [3] также имеют в перечне базовых мер по обеспечению безопасности информации аналогичную меру УПД.13 и ее возможное усиление аналогично применяется из уже рассмотренного методического документа [2].

Для автоматизированных систем управления в соответствие с п.16.7 Приказа ФСТЭК России №31 [4] должна осуществляться регламентация технического обслуживания автоматизированной системы, в том числе дистанционного (удаленного). И также в составе базового набора мер имеется мера УПД.13 по реализации защищенного удаленного доступа.

Для объектов критической информационной инфраструктуры п.13.4 Приказа ФСТЭК России №239 [5] также регламентирована возможность удаленного администрирования и имеется базовая мера УПД.13 по защите удаленного канала управления. Но при этом отдельно указано о запрете для значимых объектов критической информационной инфраструктуры предоставления удаленного доступа для сотрудников, не являющихся работниками владельца объекта или его дочерних, зависимых организаций.

Принимая во внимание, что для всех объектов информатизации при реализации удаленного доступа, в том числе для осуществления технической поддержки, реализована одна и та же мера обеспечения безопасности, которая усиливается также одним набором мер, необходимо дополнительно акцентировать внимание на использовании криптографических средств защиты при реализации канала удаленного доступа.

Базовые, организационные требования по хранению криптографических средств, обработке и передачи информации по защищенным каналам связи изложены в Приказе ФАПСИ №152 [8].

Отдельно для государственных информационных систем ФСБ России опубликовало Приказ от 24.10.2022 №524 [6], а для информационных систем персональных данных Приказ ФСБ России от 10.07.2014 г. №378 [7] с требованиями по защите информации с использованием средств криптографической защиты информации (СКЗИ).

При выборе средств криптографической защиты информации для реализации защищенного канала связи важно правильно выбрать класс криптографического средства и реализовать дополнительные меры по защите информации с целью минимизации возможных угроз и рисков. В Приказе ФСБ России от 10.07.2014 г. №378 содержатся основные требования к обеспечению безопасности информационных систем персональных данных (ИСПДн) и классификация шифровальных средств относительно уровней защищенности ИСПДн и типов актуальных угроз (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА СКЗИ ДЛЯ ИСПДН

Уровень защищенности ИСПДн	3 тип актуальных угроз	2 тип актуальных угроз	1 тип актуальных угроз
Уз 4	Отсутствуют требования в Приказе №378 ФСБ России		
Уз 3	КС1, КС», КС3 и выше	КВ и выше	-
Уз 2	КС1, КС», КС3 и выше	КВ и выше	КА
Уз 1	-	КВ и выше	КА

Приказ ФСБ России от 24.10.2022 №524 регламентирует основные требования к обеспечению безопасности государственных информационных систем (ГИС) и классификация шифровальных средств относительно уровней значимости обрабатываемой информации и масштаба информационной системы (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА СКЗИ ДЛЯ ГИС

Уровень значимости информации	Масштаб информационной системы		
	Федеральный	Региональный	Объектовый
Высокий	КВ	КС3	КС2
Средний	КС3	КС3	КС1
Низкий	КС2	КС1	КС1

При реализации защищенного удаленного канала необходимо использовать крипто средства с действующим сертификатом ФСБ, размещенные в реестре ФСБ России [9]. Классификация самих средств криптографической защиты производится исходя из возможностей и расположения предполагаемого нарушителя:

- КС1 используется если нарушитель не имеет доступа в помещение, т.е. действует за пределами контролируемой зоны;
- КС2 используется если нарушитель может находиться в пределах контролируемой зоны, но не получает непосредственный доступ к СКЗИ;
- КС3 используется если потенциальный нарушитель может получить непосредственный доступ к СКЗИ в пределах контролируемой зоны (администратор, подрядчик);

- КВ используется, если потенциальный нарушитель может перехватить трафик и исследовать его;
- КА используется, если потенциальный нарушитель мог внедрить не декларированные возможности в СКЗИ.

III. ПРОТОКОЛЫ УДАЛЕННОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ И VPN

Для большего понимания работы средств, позволяющих осуществлять удаленное администрирование необходимо рассмотреть протоколы, используемые программным обеспечением для организации канала передачи информации.

Telnet

Симметричный протокол удаленного управления telnet (Teletype Network) – один из самых старых сетевых протоколов, который используется для управления устройством через командную строку. По умолчанию использует TCP порт 23. В данном протоколе отсутствует возможность использования шифрования и проверки подлинности данных. Telnet возможно использовать только в пределах контролируемой зоны совместно со средствами защиты сетевого уровня, VPN-клиентами. Реализация данного протокола имеется в операционных системах семейства Windows и некоторых клиентских программах, как, к примеру, PuTTY.

SSH

Сетевой протокол SSH обеспечивает безопасное соединение между рабочими станциями, используя шифрование. Включает в себя три протокола: транспортный соединения и аутентификации. По умолчанию использует TCP порт 22. Данный протокол используется как правило на рабочих станциях под управлением операционных систем Linux совместно с клиентскими приложениями, такими как PuTTY и WinSCP. Протокол SSH устойчив к атакам прослушивания трафика, но неустойчив к атакам «человек посередине». Для шифрования передаваемых данных используется симметричное шифрование, алгоритмы AES, Blowfish или 3DES. Целостность передачи данных проверяется с помощью алгоритмов CRC32 в SSH1 или HMAC-SHA1/HMAC-MD5 в SSH2.

RDP

Remote Desktop Protocol – протокол прикладного уровня, используемый для удаленной работы пользователя с сервером, на котором запущен сервис терминальных подключений. Сам протокол является собственностью компании Microsoft и поэтому его исходный код закрыт. Используется преимущественно в Windows системах, но существуют сторонние реализации для операционных систем Linux, Mac, iOS, Android с меньшим функционалом. Транспорт RDP по умолчанию шифруется с помощью TLS. RDP использует потоковый шифр RC4 RSA Security с длинной ключа в 56 или 128 бит. По умолчанию протокол используется порт TCP 3389. В качестве дополнительной защиты протокол используют аутентификацию и шифрование на уровне сокетов Secure Sockets Layer (SSL). Для многих системных администраторов это наиболее популярный протокол удаленного администрирования.

HTTP

Посредством web-браузера некоторые устройства, такие как коммутаторы, маршрутизаторы, сетевые принтеры также допускают удаленное управление. Основной угрозой безопасности является то, что многие сетевые устройства и приложения передают пароль по HTTP в открытом виде. Но, тем не менее, веб-технологии активно используются для управления сайтами, базами данных. Во многих браузерах также присутствуют оснастки, позволяющие осуществлять удаленное администрирование рабочим столом другого рабочего места. Для организации удаленного управления по данному протоколу обязательно использование дополнительных средств защиты, чтобы максимально обезопасить канал связи от посторонних лиц.

PPTP

Point-to-Point Tunneling Protocol - туннельный протокол, позволяющий рабочему месту устанавливать защищённое соединение с сервером за счёт создания специального туннеля в незащищённой сети. Протокол PPTP использует технологию инкапсуляции и помещает пакеты стандарта PPP в IP-пакеты для передачи в глобальной сети. PPTP-трафик шифруется с помощью протокола шифрования данных Microsoft MPPE. Для аутентификации клиентов могут использоваться различные механизмы, такие как MS-CHAPv2 и EAP-TLS. Используется в устройствах Cisco и операционных системах Windows и Linux. Протокол работает по порту TCP 1723.

L2TP и IPsec

Layer 2 Tunneling Protocol – протокол туннелирования второго уровня, используемый для группирования данных в пакеты с целью дальнейшей передачи по глобальной сети при создании VPN соединений. Этот протокол не шифрует трафик, для этого его используют в связке с протоколом IPsec. L2TP использует порт UDP 500. Этот протокол на данный момент широко используется во многих сетевых устройствах и операционных системах. Для шифрования используется шифры 3DES или AES. Уязвимость протокола заключается в использовании ключей PSK, которые могут быть скомпрометированы для подслушивания зашифрованного трафика. Этот протокол был разработан на основе сетевого протокола второго уровня Cisco и PPTP от Microsoft.

SSTP

Secure Socket Tunneling Protocol – разработка компании Microsoft, основанный на протоколе SSL с использованием соединения по порту TCP 443. Исходный код протокола закрыт, на данный момент используется в операционных системах RouterOS, SEIL, Linux и Mac OS X. Сам протокол не шифрует данные, используя для этого SSL и уязвим для атак Poodle. Данный протокол используется в отечественном межсетевом экране ИКС (запись № 322 от 08.04.2016 г. в Едином реестре российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных) [10].

OpenVPN

На текущий момент времени OpenVPN является стандартом для коммерческих VPN сетей и реализуется на любой платформе с помощью различного клиентского программного обеспечения. Протокол для шифрова-

ния данных использует библиотеку OpenSSL, которая поддерживает криптоалгоритмы 3DES, CAST-128, Camelia, AES и Blowfish с ключами до 256 бит. Минусом данного протокола является его относительная низкая скорость работы по сравнению с другими современными протоколами VPN. При работе использует или UDP или TCP порт, который настраивается на сервере. Возможно использовать 443 порт TCP, чтобы замаскировать трафик под HTTPS. Считается в настоящее время одним из самых надежных VPN протоколов, в том числе и для мобильных устройств.

WireGuard

Современный протокол для реализации защищенной сети. ПО умолчанию использует порт TCP 51820. В работе использует потоковый симметричный шифр ChaCha20 с 256-битным ключом. Ключи хэшируются блочным шифром SipHash24, представляющим собой алгоритм ARX (Addition, Rotation, XOR — «сложение, циклический сдвиг, XOR»). Для хэширования данных используется криптографическая хэш-функция BLAKE2. Применение этого протокола предполагает глубокую проверку пакетов, поэтому трафик не маскируется в отличие от других современных протоколов. При этом данный протокол является самым быстрым на текущее время и имеет очень малый объем исходного кода.

IKEv2

Internet Key Exchange Version 2 - современный протокол VPN, разработанный Microsoft и Cisco. Использует в работе только порты UDP 500 и 4500. По быстродействию проигрывает только протоколу WireGuard, но при этом из-за закрытого исходного кода и меньшему количеству аудитов безопасности является менее надежным. Для шифрования данных используется протокол IPsec с помощью шифров AES и Camellia с 256-битными ключами. Наряду с OpenVPN является одним из самых популярных в коммерческом секторе протоколов. Возможно работа данного протокола практически на всех мобильных платформах и операционных системах.

SPICE

Simple Protocol for Independent Computing Environments - простой протокол для независимой вычислительной среды. Разработан для операционных систем Linux для подключения, управления и получения входящей информации от удаленных устройств. На данный момент используется для реализации удаленного администрирования в операционной системе RedOS и других Linux системах. Работает по порту 5900.

TERA

Протокол удаленного доступа, используемый в программном комплексе Termidesk, реализованный в операционной системе Astra Linux. Работает по порту 5900.

IV. ТРЕБОВАНИЯ К ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ПОСТАВОК ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Важным моментом в организации удаленного администрирования является выбор конечного решения и осуществление его поставки с дальнейшей реализацией проекта. Для коммерческих организаций нет видимых запретов, кроме решения руководителя организации или внутренних документов, где могут быть запрещены какие-либо конкретные программы или использование опасных протоколов связи. Если же речь идет о государ-

ственных организациях, где размещены информационные системы или объекты критической инфраструктуры, то необходимо также рассматривать законодательство в области закупок, которое вносит дополнительные ограничения, кроме тех, которые учитывались в требованиях по сертифицированным средствам защиты во второй части данной работы.

В соответствие с п.2 Постановления от 16 ноября 2015 года №1236 [11] запрещено осуществлять закупки иностранных программных средств для обеспечения государственных и муниципальных нужд. П.6.1 этого постановления также было обеспечено создание и ведение реестра российского программного обеспечения, в котором размещены отечественные аналоги иностранного программного обеспечения [12]. В случае отсутствия в данном реестре аналога необходимой иностранной программы, разрешено проводить ее закупку с обоснованием отсутствия подобной отечественной программы.

Аналогично в Постановлениях [13–15] указаны ограничения на закупки иностранной радиоэлектронной продукции и промышленных товаров и организовано ведение реестра отечественной радиоэлектронной продукции.

П.6 Указа Президента России от 01.05.2022 №250 устанавливает запрет с 1 января 2025 года организациям на использование средств защиты, произведенные в иностранных государствах.

Принимая во внимание вышеупомянутые нормативно-правовые акты, в государственных учреждениях запрещено в настоящее время осуществлять закупки иностранного программного обеспечения и средств защиты, которые необходимы для решения задач удаленного администрирования.

V. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СРЕДСТВА УДАЛЕННОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ

В организациях для удаленного администрирования в настоящее время распространены такие программы, как TeamViewer, Ammyy Admin, AnyDesk. При поиске аналога данных программ в сервисе поиска российского ПО для импортозамещения, находящегося в реестре отечественного ПО, результат выдает три программных продукта: Система удаленного мониторинга и управления «Ассистент», «Контур.Доступ» и 1С-Коннект. В случае, если в поиске аналога выбрать менее распространенные средства администрирования, такие, как, к примеру, AeroAdmin, Supremo Remote Desktop, Jump Desktop, RealVNC, RustDesk – поиск не выдает отечественных аналогов. При этом средств удаленного администрирования и представления удаленного рабочего стола отечественного производства на самом деле больше, чем всего три представителя.

PRO32 Connect

Запись в реестре отечественного ПО №14150 от 11.07.2022. Представляет собой решение по администрированию непосредственно из браузера с интеграцией с Telegram и возможность интегрировать свою платформу с помощью HTTP API. Передаваемые данные шифруются 128-битным AES-алгоритмом внутри протоколов WebRTC и SSL, поддержка двухфакторной авторизации по Telegram или Google Authenticator

LiteManager

Запись в реестре отечественного ПО №1961 от 23.09.2016. Данные, передаваемые по сети, передаются в зашифрованном виде потоковым алгоритмом с 256 битным AES ключом, также используется алгоритм шифрования открытым сеансовым ключом RSA с длиной ключа 2048 бит. Криптографические функции реализованы в сертифицированных системных библиотеках Microsoft. В LiteManager реализованы две системы авторизации: с помощью пароля и с помощью Active Directory.

RMS Удаленный доступ

Запись в реестре отечественного ПО №456 от 18.04.2016. Передаваемые данные между модулями RMS зашифрованы потоковым алгоритмом шифрования с 256-битным сеансовым AES ключом, также используется алгоритм шифрования открытым сеансовым ключом RSA с длиной ключа 2048 бит. Система авторизации построена по единому паролю и по учетной записи Windows (NTLM).

RuDesktop

Запись в реестре отечественного ПО №15913 от 09.12.2022. Производителем заявлена поддержка операционных систем Windows, MacOS, Linux, включая отечественные ОС Astra Linux, BaseAlt, РЕДОС, Android. В части безопасности используется потоковое шифрование с 256-битным ключом и транспортное шифрование (TLS).

Контур.Доступ

Запись в реестре отечественного ПО №17455 от 02.05.2023. В части безопасности используется TLS-шифрование, двухфакторная аутентификация по паролю, аутентификация оператора в сервисе. Поддерживается работа с операционными системами Windows, Linux и macOS.

1C-Коннект

Запись в реестре отечественного ПО №4563 от 05.07.2018. Для обеспечения безопасности используется шифрование TLS 1.3 по ГОСТ Р 34.12-2015. Производителем заявлена поддержка операционных систем Windows, macOS и Linux, в том числе отечественных РЭД ОС, Astra Linux и ALT Linux, а также для мобильных устройств на iOS и Android.

Система удаленного мониторинга и управления «АССИСТЕНТ»

Запись в реестре отечественного ПО №3173 от 29.03.2017. Сертификат соответствия ФСТЭК России №4162, действительный до 26.08.2024 г. с заявленной технической поддержкой до 26.08.2026 г. Данное средство администрирования уже имеет встроенные средства защиты от несанкционированного доступа и обеспечивает контроль модификации передаваемой информации и подмены сторон взаимодействия. Осуществляется регистрация событий безопасности. Заявлена совместимость с отечественными операционными системами РЕД ОС, операционными системами Альт, Astra Linux, ОС Гослинукс, операционными системами POCA, AlterOS, ОСОН "Стрелец", ОС "ОСнова" и отечественными средствами защиты информации.

Также существуют средства администрирования отечественного производства, но не вошедшие на данный момент в реестр отечественного программного обеспечения по ряду причин: Aspia, Getscreen (подана заявка на внесение в реестр), Radmin, TightVNC, ZeroViewer.

VI. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ УДАЛЕННОЙ РАБОТЫ С ГОСУДАРСТВЕННЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Отдельное внимание стоит уделить средствам обеспечения доверенного сеанса пользователей, работающих удаленно с государственными информационными системами и объектами критической информационной инфраструктуры. В 2020 году ФСТЭК России опубликовали информационное сообщение с рекомендациями по работе пользователей при реализации дистанционного режима работы [16]. С целью обеспечения безопасности информации при осуществлении дистанционной работы в настоящее время существует несколько решений, как имеющих сертификат ФСТЭК России, так и организационно-технического характера, подразумевающие проведение дополнительных аттестационных испытаний сегментов информационных систем.

В первом случае для организации доступа используются специализированные защищённые флешнакопители с набором предустановленного программного обеспечения и средств защиты, работающие по технологии LiveUSB. Реализация подобных устройств доверенного сеанса связи была исполнена компанией АО «Аладдин Р.Д.» со средством обеспечения безопасной дистанционной работы Aladdin LiveOffice (сертификат соответствия ФСТЭК России №4355, действителен до 10.02.2026). А также компанией АО «ОКБ САПР» со средством обеспечения доверенного сеанса связи «МАРШ!-2.0» (сертификат соответствия ФСТЭК России №3561, техническая поддержка до 20.05.2024).

Наличие сертификата соответствия ФСТЭК позволяет данным устройствам осуществлять дистанционную работу в государственных информационных системах, объектах критической информационной инфраструктуры, информационных системах персональных данных, обрабатывать служебные сведения ограниченного распространения и использовать электронную подпись в системах ведомственного электронного документооборота.

Во втором случае предлагается проводить аттестацию дистанционного рабочего места с установкой всех необходимых средств защиты информации под требуемый класс защищенности сегмента информационной системы.

Для решения данного вопроса АО «ОКБ САПР» предложило также использовать специальное средство вычислительной техники удалённого доступа (ССВТ УД) «TrusT Удалёнка» [17], реализованное на базе защищённых микрокомпьютеров m-TrusT (рис. 1).

Одноплатный микрокомпьютер m-TrusT обеспечивает среду функционирования криптографии по классу КС3. Дополнительно обеспечивается резидентный компонент безопасности (РКБ), встроенный в основной аппаратный блок компьютера и средство доверенной загрузки, сертифицированное ФСТЭК России.

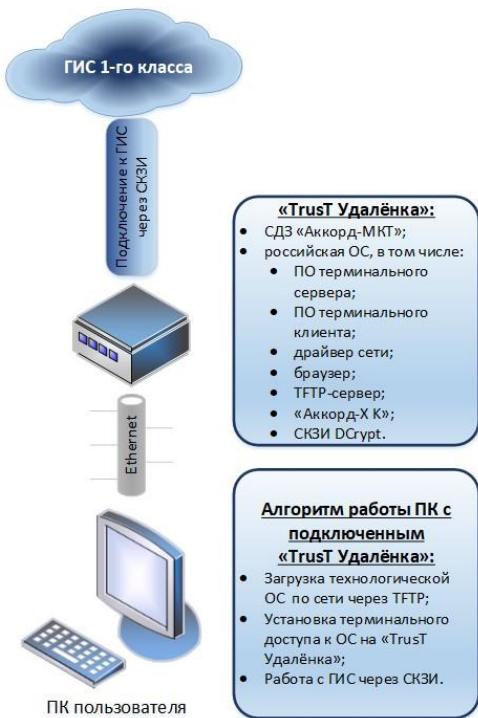


Рис. 1. Схема работы «TrusT Удалёнка»

Данное решение от АО «ОКБ САПР» является довольно интересным в плане реализации обеспечения защищённой сетевой коммуникации между элементами критической информационной инфраструктуры, но, к сожалению, этот вариант на данный момент не сертифицирован ФСБ России и ФСТЭК России.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения безопасного удаленного администрирования государственных информационных систем и объектов критической информационной инфраструктуры, ввиду требований органов государственной власти и регуляторов в области информационной безопасности, самым важным является использование отечественных программных продуктов. При этом осуществление закупок средств управления, производится лишь при наличии данного программного средства в реестре отечественного программного обеспечения. Обязательных требований к сертификации подобных продуктов ФСТЭК России или ФСБ России на данный момент нет в нормативно-правовой базе и, вследствие этого, из рассмотренных средств управления только одно имеет сертификат соответствия требованиям безопасности информации. Но, если рассматривать вопрос не управления, а повседневной дистанционной работы с защищаемыми государственными объектами, вопрос применения сертифицированных средств доверенного сеанса связи уже является актуальным. В связи с тем, что процесс сертификации средств вычислительной техники достаточно сложен и, необходимо учитывать вопросы обеспечения безопасности с применением отечественных механизмов защиты информации, подобных устройств и программных средств уже на порядок меньше доступно к использованию. Кроме того, рабочие станции, осуществляющие удаленное управление должны соответствовать требованиям безопасности информации, а канал связи дополнительно должен быть защищен с использованием отечественных криптографических средств.

Для государственных информационных систем и объектов критической инфраструктуры механизмы безопасности, которые реализованы в рассмотренных отечественных средствах администрирования недостаточно и, вследствие применения дополнительных средств защиты информации, необходимо также рассматривать вопросы совместимости конкретных средств удаленного администрирования с конкретными средствами защиты информации, в том числе криптографическими.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 N 17 "Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах" (Зарегистрировано в Минюсте России 31.05.2013 N 28608). – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-11-fevralya-2013-g-n-17> (дата обращения: 29.06.2024).
2. "Методический документ. Меры защиты информации в государственных информационных системах" (утв. ФСТЭК России 11.02.2014) – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-11-fevralya-2014-g> (дата обращения 29.06.2024).
3. Приказ ФСТЭК России от 18.02.2013 N 21 "Об утверждении Состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных" (Зарегистрировано в Минюсте России 14.05.2013 N 28375). – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21> (дата обращения: 29.06.2024).
4. Приказ ФСТЭК России от 14.03.2014 N 31 "Об утверждении Требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды" (Зарегистрировано в Минюсте России 30.06.2014 N 32919). – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-14-marta-2014-g-n-31> (дата обращения: 29.06.2024).
5. Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 N 239 "Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации" (Зарегистрировано в Минюсте России 26.03.2018 N 50524). – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239> (дата обращения: 29.06.2024).
6. Приказ ФСБ России от 24.10.2022 N 524 "Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, с использованием шифровальных (криптографических) средств" (Зарегистрировано в Минюсте России 23.11.2022 N 71073). – URL: <https://rg.ru/documents/2022/11/24/fsb-prikaz524-site-dok.html> (дата обращения: 29.06.2024).
7. Приказ ФСБ России от 10.07.2014 N 378 "Об утверждении Состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных с использованием средств криптографической защиты информации, необходимых для выполнения установленных Правительством Российской Федерации требований к защите персональных данных для каждого из уровней защищенности" (Зарегистрировано в Минюсте России 18.08.2014 N 33620). – URL: <https://rg.ru/documents/2014/09/17/zashita-dok.html> (дата обращения: 29.06.2024).
8. Приказ ФАПСИ от 13.06.2001 N 152 "Об утверждении Инструкции об организации и обеспечении безопасности хранения, обработки и передачи по каналам связи с использованием средств криптографической защиты информации с ограниченным доступом, не содержащей сведений, составляющих государственную тайну" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 06.08.2001 N 2848). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_32924/ (дата обращения: 29.06.2024).

9. Выписка из перечня средств защиты информации, сертифицированных ФСБ России. – URL: <http://clsz.fsb.ru/clsz/certification.htm> (дата обращения: 29.06.2024).
10. Secure Socket Tunneling Protocol. – URL: <https://xserver.a-real.ru/blog/useful/secure-socket-tunneling-protocol/> (дата обращения: 29.06.2024).
11. Постановление Правительства РФ от 16 ноября 2015 г. N 1236 "Об установлении запрета на допуск программного обеспечения, происходящего из иностранных государств, для целей осуществления закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд". – URL: <http://government.ru/docs/20650/> (дата обращения: 29.06.2024).
12. Реестр российского программного обеспечения. – URL: <https://reestr.digital.gov.ru/> (дата обращения: 29.06.2024).
13. Постановление Правительства РФ от 10 июля 2019 г. N 878 "О мерах стимулирования производства радиоэлектронной продукции на территории Российской Федерации при осуществлении закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, о внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 16 сентября 2016 г. N 925 и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации". – URL: <http://government.ru/docs/all/122858/> (дата обращения: 29.06.2024).
14. Постановление Правительства РФ от 30 апреля 2020 г. N 616 "Об установлении запрета на допуск промышленных товаров, происходящих из иностранных государств, для целей осуществления закупок для государственных и муниципальных нужд, а также промышленных товаров, происходящих из иностранных государств, работ (услуг), выполняемых (оказываемых) иностранными лицами, для целей осуществления закупок для нужд обороны страны и безопасности государства". – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_351809/92d969e26a4326c5d02fa79b8f9cf4994ee5633b/ (дата обращения: 29.06.2024).
15. Постановление Правительства РФ от 30 апреля 2020 г. N 617 "Об ограничениях допуска отдельных видов промышленных товаров, происходящих из иностранных государств, для целей осуществления закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд". – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_351807/ (дата обращения: 29.06.2024).
16. Рекомендации по обеспечению безопасности объектов критической информационной инфраструктуры при реализации дистанционного режима исполнения должностных обязанностей работниками субъектов критической информационной инфраструктуры от 20 марта 2020 г. N 240/84/389. – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-20-marta-2020-g-n-240-84-389> (дата обращения: 29.06.2024).
17. Защищённая «Удалёнка»: варианты реализации. – URL: <https://www.okbsapr.ru/products/solutions/ZashchishchennayaUdalenyekavariantyrealizatsii/> (дата обращения: 29.06.2024).

Разработка структуры описания инцидентов безопасности для киберфизических систем

Басан Елена Сергеевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ebasan@sfedu.ru

Быстрая Злата Александровна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
bystraia@sfedu.ru

Могильный Антон Богданович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
mogilnyy@sfedu.ru

Лесников Александр Александрович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
alesnikov@sfedu.ru

Шулика Мария Геннадьевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
mshulika@sfedu.ru

Аннотация. Инциденты безопасности могут привести к таким серьезным последствиям, как утечка конфиденциальной информации, нарушение работы систем. Цель исследования – разработка формата описания инцидента безопасности для киберфизических систем. В результате были разработаны правила обнаружения инцидентов. Полученный результат позволит эффективно и структурированно описывать инциденты безопасности, облегчая процесс их анализа и реагирования.

Abstract. Security incidents can lead to serious consequences, such as leakage of confidential information, as well as disruption of systems. The purpose of the study is to develop a structure for describing a security incident. Data on notification, analysis and classification of attacks and state machines were analyzed based on our own experiment. As a result, incident detection rules were developed. The obtained result will allow for an effective and structured description of security incidents, facilitating the process of their analysis and response.

Ключевые слова: инциденты безопасности, зашумление GPS, GPS-спуфинг, флуд TCP, флуд UDP, погодные аномалии, помехи в канале, зашумление канала.

Keywords: security incidents, GPS jamming, GPS spoofing, TCP-flood, UDP-flood, weather anomaly, jamming in channel, noise in channel.

I. ВВЕДЕНИЕ

Кибератаки и инциденты безопасности могут привести к таким серьезным последствиям для организаций, таким как потеря конфиденциальной информации, финансовые потери и другие нежелательные события. Ин-

Внутренний грант студенческим научным объединениям Южного федерального университета

Совет по грантам Президента Российской Федерации за счет средств стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов (Конкурс СП-2022) № СП-858.2022.5 по теме «Технология обеспечения кибербезопасности автоматизированных систем от активных информационных атак на основе принципа отражения».

циденты безопасности – это события или ситуации, которые привели к нарушению конфиденциальности, целостности или доступности информации, систем или ресурсов. Для эффективного реагирования на инциденты безопасности и обеспечения надлежащего уровня защиты информации необходимо применять структурированный подход к их описанию и анализу. В связи с этим разработка специальной структуры описания инцидентов безопасности становится необходимостью. Целью данного исследования является разработка структуры, которая стандартизирует процесс описания инцидентов безопасности, что позволит отправлять формализованное оповещение.

II. Существующие методологии для описания инцидентов безопасности

Фреймворки описания инцидентов безопасности – это наборы стандартов и методов, которые используются для описания инцидентов безопасности. Были выделены следующие известные фреймворки: Common Vulnerability Scoring System (CVSS) – общая система оценки уязвимостей, Industrial Security Incident Manager (ISIM) – менеджер инцидентов промышленной безопасности, Structured Threat Information eXpression (STIX) – структурированная информация об угрозах, CERT Resilience Management Model (CERT-RMM) – модель управления устойчивостью, NIST Cybersecurity Framework (NIST CSF) – фреймворк управления рисками информационной безопасности, ISO/IEC 27001, РС БР ИББС-2.5-2014. Рассмотрим каждый из них.

A. CVSS

Общая система оценки уязвимостей – это открытый стандарт оценки серьезности уязвимостей. Он различает несколько типов метрик: базовые, временные и контекстные, а затем проводит оценку на основе данных метрик и набора формул [1].

B. ISIM

Менеджер инцидентов промышленной безопасности – это набор стандартов и методов, которые используются для управления инцидентами безопасности. Включает такие процессы, как обнаружение инцидентов, анализ, реагирование и предотвращение.

C. STIX

Структурированная информация об угрозах – это язык и формат сериализации. Позволяет организациям анализировать и обмениваться данными об угрозах с доверенными партнерами и сообществами. Используя эту систему, можно искать данные по любому шаблону атаки, плану действий, злоумышленнику или уязвимости [2].

D. CERT-RMM

Модель управления устойчивостью CERT – это модель, которая определяет процессы управления операционной устойчивостью в сложных, меняющихся условиях риска [3].

E. NIST Cybersecurity Framework

Платформа управления рисками кибербезопасности NIST – это документ Национального института стандартов и технологий, определяющий стандарты безопасности и средства контроля для федеральных информационных систем в США.

F. ISO/IEC 27001

Стандарт безопасности, который официально определяет систему управления информационной безопасностью (СУИБ). В качестве официальной спецификации он устанавливает требования, которые определяют порядок внедрения, контроля, поддержания и непрерывного улучшения СУИБ [4].

G. РС БР ИББС-2.5-2014

Документ Центрального банка России РС БР ИББС-2.5-2014 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Менеджмент инцидентов информационной безопасности» определяет классификатор событий информационной безопасности (ИБ), приводящих к инцидентам ИБ, с описанием их атрибутов и уровней системы [5].

Проанализировав эти фреймворки, можно сделать вывод, что там хранится обобщенная информация, из которой необходимо выбирать подходящие для организации данные, а не создавать их самостоятельно. Поэтому возникла идея создать собственную структуру инцидентов безопасности киберфизических систем (КФС) для улучшения защиты от угроз безопасности, а также для структурирования и документирования инцидентов безопасности, улучшения их понимания, реагирования и предотвращения.

III. СТРУКТУРА ИНЦИДЕНТОВ БЕЗОПАСНОСТИ

Так как беспилотные автоматизированные системы (БАС) являются видом КФС, будем описывать структуру инцидентов, основываясь на архитектуре БАС. Структура инцидента будет состоять из самого инцидента, индикатора, описания, анализа оповещений и классификации атак, оповещения от машины состояний, правил или выражений. Эти параметры были выбраны на основе данных, собранных из испытаний беспилотных автоматизи-

рованных систем. На рис. 1 представлен граф, описывающий структуру инцидента, который помогает определить, с какими параметрами связан инцидент. Анализ атак и классификация оповещений дает нам информацию об аномалии или атаке, что позволяет описать инцидент.



Рис. 1. Атрибуты инцидента

Подробнее рассмотрим каждую из ветвей графа.

- Инцидент связан со всеми параметрами, которые важны для детального описания инцидента безопасности беспилотной автоматизированной системы.
- Описание содержит подробную информацию о возникновении инцидента, а именно: тип инцидента, причину инцидента и последствия инцидента.
- Индикатор сигнализирует о возникновении инцидента в информационной системе или сети.
- Оповещение от машины состояния хранит информацию о тегах, которые приходят в модуль оператора для сигнализации об изменениях во время полета или посадки беспилотных автоматизированных систем.
- Анализ атак и классификация оповещений хранит информацию о коде статуса, который приходит в модуль оператора. Этот код статуса должен определять, что именно произошло – атака, угроза или аномалия.
- Правило или выражение хранят информацию о том, какие параметры точно указывают, какой тип инцидента происходит в данный момент времени в беспилотной автоматизированной системе.

Рассмотрим инциденты безопасности, которые являются типичными для беспилотных автоматизированных систем [6]. На рис. 2 показан график с индикаторами инцидентов безопасности.

Расшифруем выделенные индикаторы инцидентов безопасности.

- ИН-1: Изменение траектории движения БАС из-за подмены навигационного сигнала [7].
- ИН-2: Изменение траектории движения из-за сильного ветра [8].
- ИН-3: Изменение траектории движения БАС в результате глушения навигационного сигнала.

- ИН-4: Изменение траектории движения БАС из-за низкого уровня связи [9].
- ИН-5: Изменение высоты БАС из-за низкого заряда аккумулятора [10].
- ИН-6: Потеря управления БАС в результате глушения канала связи.

ИН-7: Вторжение в систему БАС в результате подмены канала связи.

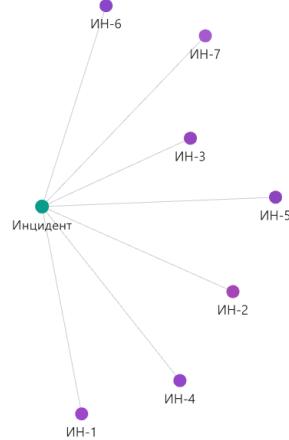


Рис. 2. Граф с индикаторами инцидента

IV. ПРИМЕРЫ ОПИСАНИЯ ИНЦИДЕНТОВ БЕЗОПАСНОСТИ В БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Были созданы описания инцидентов безопасности для беспилотных автоматизированных систем. Описание инцидента хранит важные данные для идентификации инцидента. Были выделены следующие виды инцидентов.

- Атака GPS-spoofing – это подмена навигационного сигнала со спутника поддельным, более мощным сигналом. В результате подмены все близлежащие GPS-приемники будут считать поддельный сигнал легитимным [11].
- Anomaly Weather – это погодная аномалия, подразумевающая несоответствие показателей долгосрочным средним значениям.
- Атака GPS-jamming – это глушение навигационного сигнала, когда на частотах спутников генерируется много помех, и приемник просто не может выделить полезный сигнал.
- Атака подмены канала – это кибератака, в которой мошенник выдает себя за доверенный источник, чтобы получить доступ к конфиденциальным данным или информации.
- Атака глушения канала представляет собой преднамеренное создание помех, затрудняющих прием сигнала, тем самым задерживая или предотвращая активацию физических процессов, требующих беспроводной связи [12].
- Оповещение от машины состояния хранит метки данных, которые позволяют более точно охарактеризовать инцидент, а именно состояние аккумулятора, состояние координат, состояние высоты, количество спутников, скорость полета.

Рассмотрим схему всех процессов на рис. 3, которая включает все данные, содержащиеся в карточке инцидента безопасности для беспилотных автоматизированных систем.

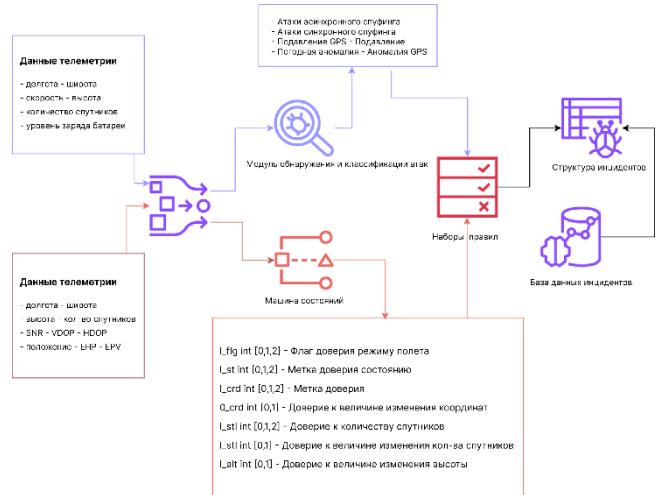


Рис. 3. Схема процесса всех входящих компонентов для описания инцидента безопасности в беспилотных автоматизированных системах

На этой схеме показано взаимодействие всех компонентов друг с другом. Полученные данные через телеметрию передаются в модуль обнаружения и классификации атак, где обрабатывается запрос и отправляется код статуса обнаруженной атаки или аномалии, а также передаются в машину состояний, где принимаются следующие теги: доверие к количеству спутников, доверие к величине изменения высоты, доверие к величине изменения скорости, доверие к режиму полета, доверие к величине изменения скорости. После этого данные передаются в модуль принятия решений, где работает набор правил, на основе системы правил для определения более точного объяснения инцидента безопасности. После этого формируется карточка инцидента безопасности, и обработанные данные передаются в базу данных инцидентов.

Теперь машина состояний имеет следующие характеристики [13]. Анализируются 7 параметров – состояние программируемого логического контроллера (ПЛК) и состояние относительно земли, широта, долгота, высота, скорость, количество навигационных спутников, заряд аккумулятора в процентах.

Набор данных для каждого анализируемого параметра может состоять из трех полей – текущее значение параметра, предыдущее (пройденное) целевое значение участка траектории с префиксом «l_», целевое значение участка траектории с префиксом «t_». Согласно заданным правилам, были выбраны следующие метки параметров: долгота – lng, широта – ltt, высота – alt, заряд аккумулятора – chr, режим ПЛК – flg, количество используемых спутников – stl, координаты – crd. Входные данные представлены словарем со следующими полями: tms, временная метка, набор данных для каждого анализируемого параметра.

Рассмотрим описания выделенных инцидентов для беспилотной автоматизированной системы.

A. ИН-1

В табл. 1 показан инцидент, когда злоумышленник находится вблизи КФС и излучает сигнал большей мощности на требуемой частоте, при этом изменяя действительные данные о координатах и времени полета на свои собственные.

ТАБЛИЦА 1. ОПИСАНИЕ ИНЦИДЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ ИН-1

Название инцидента – Изменение траектории полета БАС из-за подмены навигационного сигнала	
Дата инцидента – 01.04.24	Время инцидента – 16:00 Подзаголовок
Индикатор инцидента – ИН-1	Связанные события/инциденты – N/A
Контактные данные работника, занимающегося инцидентом	
Анализ оповещений и классификация атак	
Метка с информацией о подмене навигационного сигнала GPS_SPOOFING	
Оповещение от машины состояний	
1_flg int [0,1,2] – Метка доверия к режиму полета 1_st int [0,1,2] – Метка доверия к состоянию 1_crd int [0,1,2] – Метка доверия к координатам 0_crd int [0,1] – Метка доверия к величине изменения координат 1_stl int [0,1,2] – Метка доверия к количеству спутников 1_stl int [0,1] – Метка доверия к величине изменения количества спутников 1_alt int [0,1] – Метка доверия к величине изменения высоты	
Правило или выражение	
$GNSS_{SPOOF} = ((GPS_SPOOFING) \cap (l_stl)) \cup ((l_flg) \cup (l_st) \cup (l_crd) \cup (0_crd) \cup (l_alt))$	

Для того, чтобы определить, какой был инцидент, были разработаны формализованные правила [14], которые показывают код статуса атаки GPS_SPOOFING, а также метки, которые должны быть выполнены l_scl всякий раз, когда замечена данная атака, и которые могут присутствовать или не присутствовать в данной атаке ($l_flg, l_st, l_crd, l_alt, 0_crd$).

B. ИН-2

В табл. 2 показан инцидент, связанный с усилением ветра, повлиявшие на траекторию полета БАС.

ТАБЛИЦА 2. ОПИСАНИЕ ИНЦИДЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ ИН-2

Название инцидента – Изменение траектории полета из-за сильного ветра	
Дата инцидента – 01.04.24	Время инцидента – 16:00 Подзаголовок
Индикатор инцидента – ИН-2	Связанные события/инциденты – N/A
Контактные данные работника, занимающегося инцидентом	
Анализ оповещений и классификация атак	
Метка с информацией об аномалии погоды WEATHER_ANOMALY	
Оповещение от машины состояний	
1_flg int [0,1,2] – Метка доверия к режиму полета 1_st int [0,1,2] – Метка доверия к состоянию 1_crd int [0,1,2] – Метка доверия координатам 0_crd int [0,1] – Метка доверия к величине изменения координат	
Правило или выражение	
$PATH_{WIND} = (WEATHER_ANOMALY) \cup (l_flg) \cup (l_st) \cup (l_crd) \cup (0_crd)$	

Для определения типа инцидента, были разработаны наборы формализованных правил [14], показывающие код состояния аномалии WEATHER_ANONALY, а так-

же метки, указывающие на аномалию, так как при сильном ветре нет прямых строгих параметров. Если отображается хотя бы одна из этих меток, то это аномалия ($l_flg, l_st, l_crd, 0_crd$).

C. ИН-3

В табл. 3 показан инцидент, когда злоумышленник находится вблизи БАС и излучает сигнал на тех же частотах, что и навигационные системы, чтобы подавить или исказить их сигналы.

ТАБЛИЦА 3. ОПИСАНИЕ ИНЦИДЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ ИН-3

Название инцидента – Изменение траектории полета БАС в результате глушения навигационного сигнала	
Дата инцидента – 01.04.24	Время инцидента – 16:00 Подзаголовок
Индикатор инцидента – ИН-3	Связанные события/инциденты – N/A
Контактные данные работника, занимающегося инцидентом	
Анализ оповещений и классификация атак	
Метка с информацией о глушении навигационного сигнала GPS_JAMMING	
Оповещение от машины состояний	
1_flg int [0,1,2] – Метка доверия к режиму полета 1_st int [0,1,2] – Метка доверия к состоянию 1_crd int [0,1,2] – Метка доверия координатам 1_stl int [0,1] – Метка доверия к величине изменения количества спутников 1_alt int [0,1] – Метка доверия к величине изменения высоты 1_spd int [0,1] – Метка доверия к величине изменения скорости	
Правило или выражение	
$GNSS_{JAMM} = ((GPS_JAMMING) \cap (l_stl)) \cup ((l_flg) \cup (l_st) \cup (l_crd) \cup (l_alt))$	

Чтобы определить тип инцидента, были разработаны наборы формализованных правил [14], которые показывают код статуса атаки GPS_JAMMING, а также метки, которые должны выполняться всегда (l_stl, l_spd) при обнаружении данной атаки, и которые могут присутствовать или не присутствовать в данной атаке ($l_flg, l_st, l_crd, l_alt$).

D. ИН-4

В табл. 4 показан инцидент, когда модуль оператора с антенной для связи находится на большом расстоянии от БАС.

ТАБЛИЦА 4. ОПИСАНИЕ ИНЦИДЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ ИН-4

Название инцидента – Изменение траектории полета БАС из-за низкого уровня связи	
Дата инцидента – 01.04.24	Время инцидента – 16:00 Подзаголовок
Индикатор инцидента – ИН-4	Связанные события/инциденты – N/A
Контактные данные работника, занимающегося инцидентом	
Анализ оповещений и классификация атак	
Метка низкого заряда аккумулятора LOW_SIGNAL	
Оповещение от машины состояний	
1_chr int [0,1,2] – Метка доверия к аккумулятору 2_chr int [0,1] – Метка доверия к установке аккумулятора 1_flg int [0,1,2] – Метка доверия к режиму полета 1_st int [0,1,2] – Метка доверия к состоянию 1_crd int [0,1,2] – Метка доверия к координатам	
Правило или выражение	
$PATH_{BATTERY} = ((LOW_BATTERY) \cap (l_chr)) \cup ((2_chr) \cup ((l_flg) \cup (l_st) \cup (l_crd)))$	

Для того, чтобы определить тип инцидента, были разработаны правила [14], показывающие состояние заряда сигнала **LOW_SIGNAL**, а также метки, которым следует следовать всякий раз (l_chr 2_chr) когда замечена данная аномалия, и которые могут присутствовать или отсутствовать в данной аномалии (l_flg , l_st , l_crd).

E. ИН-5

В табл. 5 показан инцидент, где состояние аккумулятора БАС отображается в модуле оператора.

ТАБЛИЦА 5. ОПИСАНИЕ ИНЦИДЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ ИН-5

Название инцидента – Изменение высоты полета БАС из-за низкого заряда аккумулятора	
Дата инцидента – 01.04.24	Время инцидента – 16:00 Подзаголовок
Индикатор инцидента – ИН-5	Связанные события/инциденты – N/A
Контактные данные работника, занимающегося инцидентом	
Анализ оповещений и классификация атак	
Метка низкого заряда аккумулятора LOW_BATTERY	
Оповещение от машины состояний	
$l_chr \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия аккумулятора $2_chr \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к установке аккумулятора $l_flg \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к режиму полета $l_alt \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения высоты $l_st \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к состоянию $l_crd \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к координатам	
Правило или выражение	
$PATH_{BATTERY} = ((LOW_BATTERY) \cap (l_chr) \cap (2_chr) \cap (l_alt)) \cup ((l_flg) \cup (l_st) \cup (l_crd))$	

Для того, чтобы определить тип инцидента, были разработаны правила [14], которые показывают состояние заряда батареи **LOW_BATTERY**, а также метки, которые следует соблюдать всякий раз (l_chr 2_chr) когда замечена данная аномалия, и которые могут присутствовать или не присутствовать при данной аномалии (l_flg , l_st , l_crd).

F. ИН-6

В табл. 6 показан инцидент, когда злоумышленник находится рядом с БАС и посыпает сигнал на тех же частотах, что и канал связи БАС, чтобы подавить или исказить его сигналы.

ТАБЛИЦА 6. ОПИСАНИЕ ИНЦИДЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ ИН-6

Название инцидента – Потеря управления БАС в результате глушения канала связи	
Дата инцидента – 01.04.24	Время инцидента – 16:00 Подзаголовок
Индикатор инцидента – ИН-6	Связанные события/инциденты – N/A
Контактные данные работника, занимающегося инцидентом	
Анализ оповещений и классификация атак	
Информационная метка атаки глушения связи JAMMING IN CHANNEL	
Оповещение от машины состояний	
$l_flg \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к режиму полета $l_st \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к состоянию $l_crd \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к координатам $0_crd \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения координат $l_stl \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к количеству спутников $l_stl \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения количества спутников $l_alt \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения высоты $l_spd \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения скорости	
Правило или выражение	
$CHANNEL_{JAMM} = ((JAMMING_IN_CHANNEL) \cap (l_spd) \cap (l_crd) \cap (0_crd)) \cup (l_stl) \cup (l_flg) \cup (l_alt)$	

Это может привести к потере связи между БАС и оператором. Для определения инцидента были разработаны формулы [13], которые показывают код статуса атаки **JAMMING_IN_CHANNEL**, а также метки, которые должны выполняться всегда (l_crd , 0_crd) при обнаружении данной атаки, и которые могут присутствовать или не присутствовать в данной атаке (l_flg , l_stl , l_alt).

G. ИН-7

В табл. 7 показан инцидент, когда злоумышленник находится вблизи БАС и излучает сигнал на тех же частотах, что и канал связи БАС, чтобы подавить или исказить его сигналы.

ТАБЛИЦА 7. ОПИСАНИЕ ИНЦИДЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ ИН-7

Название инцидента – Вторжение в систему БАС в результате подмены канала связи	
Дата инцидента – 01.04.24	Время инцидента – 16:00 Подзаголовок
Индикатор инцидента – ИН-7	Связанные события/инциденты – N/A
Контактные данные работника, занимающегося инцидентом	
Анализ оповещений и классификация атак	
Метка с информацией об атаке спуфинга SPOOFING_IN_CHANNEL	
Оповещение от машины состояний	
$l_flg \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к режиму полета $l_st \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к состоянию $l_crd \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к координатам $0_crd \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения координат $l_stl \text{ int } [0,1,2]$ – Метка доверия к количеству спутников $l_stl \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения количества спутников $l_alt \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения высоты $l_spd \text{ int } [0,1]$ – Метка доверия к величине изменения скорости	
Правило или выражение	
$CHANNEL_{SPOOF} = ((SPOOFING_IN_CHANNEL) \cap (l_spd) \cap (l_crd)) \cup (l_flg) \cup (l_stl) \cup (l_alt)$	

Это может привести к потере связи между БАС и оператором. Для того, чтобы определить тип инцидента, были разработаны правила [14], которые показывают код статуса атаки **SPOOFING_IN_CHANNEL**, а также метки, которые должны выполняться всегда (l_crd , l_spd), когда данная атака замечена, и которые могут присутствовать или не присутствовать в данной атаке (l_flg , l_stl , l_alt , l_st).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка и внедрение структуры для описания инцидентов безопасности играет важную роль в обеспечении безопасности информационных систем и данных. Тщательное документирование и анализ инцидентов позволяют не только эффективно реагировать на угрозы, но и повышать уровень защиты информации в целом. Структура описания инцидента предоставляет специалистам по информационной безопасности удобный инструмент для описания, классификации и анализа инцидентов безопасности. К его преимуществам относятся улучшение процесса реагирования на инциденты, повышение эффективности и производительности специалистов, упрощение коммуникации между заинтересованными сторонами в сфере безопасности. Разработка и использование структуры для описания инцидентов безопасности является важным шагом на пути к повышению уровня информационной безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. CVSS: [сайт]. – URL: <https://www.first.org/cvss/> (дата обращения: 12.06.2024). – Текст : электронный.
2. STIX: [сайт]. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 12.06.2024). – Текст: электронный.
3. CERT RMM : [сайт]. – URL: <https://insights.sei.cmu.edu/library/cert-resilience-management-model-cert-rmm-version-12/> (дата обращения: 12.06.2024). – Текст : электронный.
4. ISO/IEC 27001:2022: [сайт]. – URL: <https://www.iso.org/ru/standard/27001> (дата обращения: 12.06.2024). – Текст: электронный.
5. РС БР ИББС-2.5-2014 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации. Менеджмент инцидентов информационной безопасности». РЕКОМЕНДАЦИИ В ОБЛАСТИ СТАНДАРТИЗАЦИИ БАНКА РОССИИ: [сайт]. – URL: <https://basec.garant.ru/70667338/> (дата обращения: 12.06.2024). – Текст: электронный.
6. Holdgaard T. A Security Framework for Unmanned Aerial Vehicles and Practical Exploitation Analysis. – 2017. – P. 31-45.
7. Kasprzyk P, Konert A. Reporting UAS related incidents under aviation occurrence reporting legislation // 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE Xplore.
8. Sigurd Haugse. Investigation of UAV related incidents and accidents. – 2022. – 11-28
9. Sánchez S.M., Valdés R.M.A., Comendador F.G., Cuerno-Rejado C. Unmanned vs manned Aircraft Systems accidents investigation: post-accident analysis, benchmarking and improvements. – <https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-429>.
10. Kasprzyk P.J., Konert A. Reporting and Investigation of Unmanned Aircraft Systems (UAS) Accidents and Serious Incidents. Regulatory Perspective // J Intell Robot Syst. – 2021. – 103, 3. – <https://doi.org/10.1007/s10846-021-01447-6>.
11. Munny R., Hu J. Power Side-Channel Attack Detection through Battery Impedance Monitoring // 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Daegu, Korea, 2021. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ISCAS51556.2021.9401542.
12. Basan E., Basan A., Nekrasov A., Fidge C., Sushkin N., Peskova O. GPS-Spoofing Attack Detection Technology for UAVs Based on Kullback–Leibler Divergence // Drones. – 2022. – 6(1):8. – <https://doi.org/10.3390/drones6010008> (IF 5.532, JCR Q2, SJR Q1, Web of Science, Scopus, RSCI).
13. Basan E., Basan A., Nekrasov A., Fidge C., Abramov E., Basyuk A. A Data Normalization Technique for Detecting Cyber Attacks on UAVs // Drones. – 2022. – 6, 245. – <https://doi.org/10.3390/drones6090245> (IF 5.532, JCR Q2, SJR Q1, Web of Science, Scopus, RSCI).
14. Basan E., Basan A., Nekrasov A., Basyuk A., Lesnikov A. Trusted Operation of Cyber-Physical Processes Based on Assessment of the System’s State and Operating Mode // Sensors. – 2023. – 23 (4), 1996. (IF 3.031, JCR Q1, SJR Q1, Web of Science, Scopus, RSCI).

Классификация и оценка качества источников индикаторов компрометации

Абрамов Евгений Сергеевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
abramoves@sedu.ru

Белов Николай Евгеньевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
info@ictis.sedu.ru

Аннотация. В статье представлены результаты разработки критериев для классификации и оценки качества публичных источников данных о киберугрозах («фидов»). Проанализированы основные параметры источников данных, проблемы при выборе и использовании фидов. Предложена таксономия для классификации источников данных по информационной безопасности и разработана схема процесса скоринга источников.

Abstract. The article presents the results of developing criteria for classifying and assessing the quality of public sources of data on cyber threats ("feeds"). The main parameters of data sources, problems in choosing and using feeds are analyzed. A taxonomy for classifying sources of data on information security is proposed and a scheme for the scoring process of sources is developed.

Ключевые слова: индикатор компрометации, источник индикатора компрометации, рейтинг источников.

Keywords: indicator of compromise, feed, source rating.

I. ВВЕДЕНИЕ

Threat Intelligence (киберразведка или аналитика киберугроз) – это знания (включая контекст, механизмы, тактики, техники, последствия и практические рекомендации), которые получены на основе фактических данных о существующей или возникающей угрозе или опасности для активов и которые могут использоваться для принятия решений о реагировании субъекта на эту угрозу или опасность [1].

В графическом виде можно представить аналитику киберугроз в виде многоуровневой модели (рис. 1) понятий и связанных с ними инструментов.

Данные – это необработанные и неоспоримые факты, статистика. Но сами по себе «сырые» данные имеют невысокую ценность для аналитики.

Информация – это агрегация сырых данных в такую форму, при помощи которой можно получить ответ на поставленный вопрос.

Знания – это результат анализа данных и информации, позволяющий выявлять закономерности и определять контекст процесса, используемый для принятия мотивированных решений.

II. ТРЕБОВАНИЯ КАЧЕСТВА ИСТОЧНИКОВ ИНДИКАТОРОВ КОМПРОМЕТАЦИИ

Целью использования аналитики киберугроз является устранение пробелов в знаниях о релевантных киберугрозах, которые могут привести к взлому и нарушению работоспособности бизнес-процессов компании.

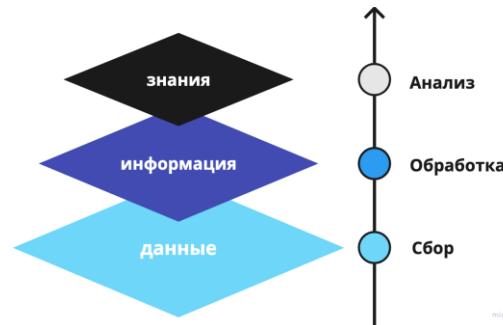


Рис. 1. Модель представления аналитики киберугроз

Источники индикаторов (feeds, фиды) являются одним из основных источников информации Threat Intelligence. Они предполагают, постоянный и обновляемый поток данных о событиях кибербезопасности. Этими данными могут быть, например, информация о прошлых и реальных атаках, информация о вредоносных программах или подозрительных IP-адресах.

Источники аналитики угроз обычно предоставляются разными организациями и могут быть бесплатными (с открытым исходным кодом) или платными.

Бесплатные обычно распространяются сообществами безопасности, такими как CERT. Проблема этих источников в том, что они не проверены и имеют проблемы с точкой зрения точности.

Платные каналы в большинстве случаев предоставляются конкретными специализированными компаниями. В этом случае компании несут ответственность за проверку фидов перед их распространением.

Для адекватной оценки мер, необходимых для защиты конкретной инфраструктуры, необходимо правильно определить поверхность атаки. В данном случае важно не пытаться охватить всё – нужно понимать ограничения защиты, т.к. пытаясь защитить всё – не защищаешь ничего. Важную роль в этом играет выбор набора необходимых и достаточных источников индикаторов [2].

Разработка правильного набора требований позволяет:

- отслеживать релевантные именно для отрасли источники угроз;
- собирать наиболее полезные данные;
- внедрять только нужные продукты для обеспечения защиты;
- избежать бессмысленных трат на сбор и времени на анализ нерелевантной информации;
- выставить приоритеты и снизить объём анализируемой информации.

Фиды представляют собой подготовленные наборы данных, которые применяются для реагирования на инциденты, обнаружения угроз и получения детальной информации о них.

Наборы данных представляют собой как сетевые, так и хостовые индикаторы компрометации (IoCs). Чаще всего фиды включают в себя следующие типы индикаторов компрометации [1]:

- IP – список IP-адресов, которые замечены в использовании киберпреступниками (например, серверы C2);
- URL – список вредоносных URL;
- domain – список вредоносных доменов;
- hash – список вредоносных контрольных сумм файлов (MD5, SHA1, SHA256).

Качественные потоки данных об угрозах не только предоставляют конкретные значения индикаторов, собранные с помощью различных инструментов, но и нормализуют их, фильтруют ненужную информацию, обогащают дополнительным контекстом и присваивают каждому индикатору показатель уровня опасности. Это позволяет пользователям быстро и легко получать доступ к самой актуальной и точной информации о киберугрозах.

Информация об угрозах может поступать в фиды из различных источников, в том числе [3]:

- результатов исследования различных кластеров активности;
- результатов анализа вредоносного программного обеспечения;
- результатов анализа инфраструктуры злоумышленников;
- результатов анализа инструментов, которые используют злоумышленники;
- результатов реагирований на инциденты;
- данных, получаемых с различных средств защиты информации;
- данных, получаемых с ханипотов — ресурсов, представляющих собой приманку для злоумышленников;
- данных из открытых источников, например публичных исследований, распространяемых свободно потоков
- данных об угрозах и т. п.

В индустрии выделяют следующие основные проблемы при выборе и использовании фидов [1]:

1. Отсутствие контекста для определения соответствия ландшафту угроз (привязка к индустрии).
2. Слабый гео-контекст (привязка к региону).
3. Юрисдикция поставщика данных.
4. Формат данных (далеко не всегда это STIX).
5. Отсутствие научно обоснованных моделей и методов оценки (скоринга) фидов.

Таким образом, можно сформулировать следующие наиболее важные параметры источника данных о киберугрозах:

- Доступность (открытый или платный).
- Типы данных (типы поставляемых индикаторов).
- Наличие обогащения (контекста индикаторов).
- Релевантность данных (по отношению к индустрии потребителя).
- Актуальность данных (скорость появления индикаторов в источнике от первого их обнаружения).
- Уникальность данных (отсутствие дублирование с другими источниками).
- Эффективность данных (уровень ложных срабатываний).

III. Таксономия для классификации источников данных

Для классификации источников данных был использован таксономический подход [4]. Методология состоит из следующих четырех этапов:

1. Планирование.
2. Идентификация и извлечение.
3. Проектирование и разработка.
4. Проверка.

На этапе 1 были проанализированы различные источники индикаторов. На этапе 2 были взяты различные категории и измерения на основе источников [4, 5]. В графическом виде таксономия представлена на рис. 2. Таксономия для классификации источников данных включает шесть измерений:

1. Тип информации.
2. Интегрируемость.
3. Оперативность.
4. Оригинальность.
5. Тип источника.
6. Надёжность.

Тип информации

Источник информации может предоставлять более одного типа информации. Следовательно, возможны множественные классификации относительно типа информации. Например, база данных уязвимостей может предоставлять информацию об уязвимостях и возникающих рисках.

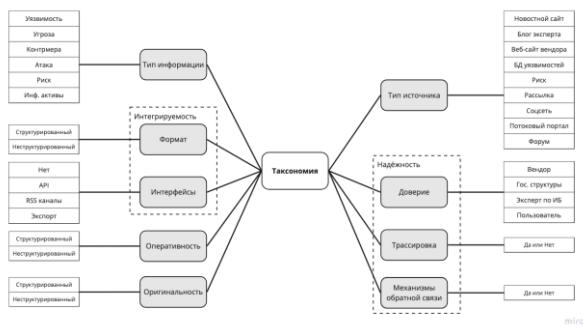


Рис. 2. Таксономия источников данных

Интегрируемость

В нашем случае под интегрируемостью понимается то, как поставляемая фидом информация может быть автоматически интегрирована в процессы обеспечения информационной безопасности организации [4]. Уровень интегрируемости источников данных определяется форматом поставляемой информации и предоставляемыми интерфейсами (API, форматы экспорта и др.) [6].

Оперативность

Оперативность играет важную роль в управлении рисками информационной безопасности, поскольку необходимая информация (например, о возникающих угрозах) должна поступать в подходящее время для принятия соответствующих мер. Например, если организация своевременно получает информацию о возникающей угрозе, она может успеть принять контрмеры и отразить атаку на ранней стадии.

Оригинальность

Чтобы принять решение об оригинальности и новизне поставляемой информации, таксономия классифицирует ее происхождение. Различают следующие два типа источников:

- Первоисточник: информация исходит из источника данных, такого как NVD, ГосСопки, Банка данных угроз безопасности информации ФСТЭК и т.п. источников, которые публикуют свою собственную информацию.
- Вторичный источник: информация интегрируется или копируется из другого источника данных по информационной безопасности, такого как мешающий источник, интегрирующий информацию из нескольких исходных источников.

Тип источника

Таксономия различает следующие девять типов источников данных киберразведки:

- Новостной веб-сайт.
- Экспертный блог.
- Веб-сайт вендора.
- База данных уязвимостей.
- Архив почтовой рассылки.
- Социальная сеть.
- Потоковый портал.

8. Форум.

9. Другое.

Эти типы были сформулированы по результатам анализа на этапе 1 классификации источника, как описано выше.

Надёжность

Надежность играет важную роль при обмене информацией об угрозах, поскольку ложная информация может иметь огромное влияние на организационные процессы. Для данного класса необходимо оценивать доверие к фиду в зависимости от типа поставщика данных, трассировку источника [7] и наличие механизмов обратной связи. В общем случае фид может иметь более одного типа издателя.

Под трассировкой источника информации понимается возможность отследить её конкретного издателя и дату публикации на основе метаданных.

Под механизмами обратной связи понимается наличие пользовательских оценок или комментариев относительно ценности поставляемой фидом информации.

IV. ПРОЦЕССНАЯ СХЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИСТОЧНИКОВ

Предложенная таксономия может быть интегрирована в процесс получения оценок (скоринга) источников данных киберразведки [2]. На рис. 3 представлена процессная схема оценки качества источников. Таксономия применяется как в пользовательском контуре на этапе 4 (поиск источников по индустриям), так и включается в схему обратной связи с контуром платформы анализа данных о киберугрозах на этапах 5-7 для актуализации значений скоринга.

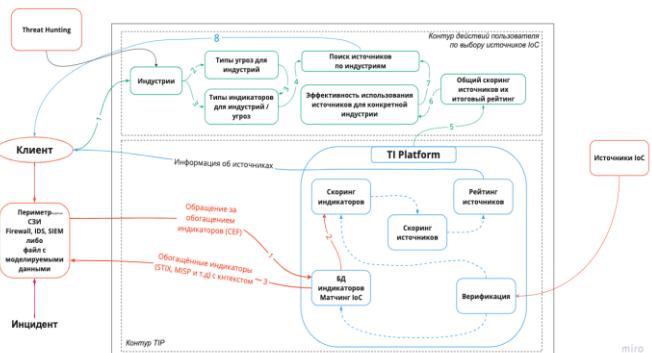


Рис. 3. Процессная схема оценки качества источников

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты разработки критерий для классификации и оценки качества публичных источников данных о киберугрозах («фидов»). Проанализированы основные параметры источников данных, проблемы при выборе и использовании фидов. Предложена таксономия для классификации источников данных по информационной безопасности и разработана схема процесса скоринга источников.

Полученные результаты позволяют обоснованно подойти к процессу оценки качества используемых источников индикаторов компрометации.

В дальнейшем планируется рассмотреть различные типы индикаторов компрометации и влияние их совместного появления на качество поставляемых источником данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Е.С., Туманов Д.А., Хабаров О.П., Токарев М.В. Методика классификации открытых источников данных о киберугрозах по отраслям промышленности // Системный синтез и прикладная синергетика : сборник научных работ X Всероссийской научной конференции, пос. Нижний Архыз, 28 сентября – 02 2021 года. – Ростов-на-Дону, Таганрог: ЮФУ, 2021. – С. 158-163.
2. Абрамов Е.С., Туманов Д.А. Поиск и скоринг источников индикаторов компрометации индустриям // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 8 (46). – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2024/9451>.
3. Sauerwein, Clemens & Pekaric, Irdin & Felderer, Michael & Breu, Ruth. An Analysis and Classification of Public Information Security Data Sources used in Research and Practice // Computers & Security. – 2018. – 82. – 10.1016/j.cose.2018.12.011.
4. Muhammad Usman, Ricardo Britto, Jurgen Borstler, and Emilia Mendes. Taxonomies in software engineering: A systematic mapping study and a revised taxonomy development method // Information and Software Technology. – 2017.
5. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012 «Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель».
6. Sean Barnum. Standardizing cyber threat intelligence information with the structured threat information expression (STIX). MITRE Corporation, 11, 2012.
7. Carlo Batini, Cinzia Cappiello, Chiara Francalanci, and Andrea Maurino. Methodologies for data quality assessment and improvement // ACM computing surveys (CSUR). – 200941(3):16.

Секция VIII

СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

DOI: 10.18522/syssyn-2024-71

От объекта до системы управления. Подготовка инженерных кадров

Имаев Дамир Хабибович

Санкт-Петербургский

государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия
damir.imaev@mail.ru

Немудрук Максим Леонидович

Санкт-Петербургский

государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия
nemotmax@mail.ru

Федоров Михал Степанович

Санкт-Петербургский

государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия
mfed.sibur@gmail.com

Шестопалов Михаил Юрьевич

Санкт-Петербургский

государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия
shestopalov_08@mail.ru

Щуров Дмитрий Александрович

Санкт-Петербургский

государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, Россия
dima2735612@gmail.com

Аннотация. Обсуждается проблема интегрирования фрагментарных знаний студентов по моделированию управляемых объектов, теории и методам синтеза алгоритмов управления и реализации систем. Предлагается концепция проекта, выполнение которого подчинено принципу «от конкретного объекта до реальной системы управления». Приводится содержание проекта по разработке системы автоматической стабилизации установившихся режимов виртуального объекта, процессы в котором подчинены интуитивно ясным физическим законам.

Abstract. The problem of integrating students' fragmentary knowledge of modeling technical objects, theory and methods of synthesis of control algorithms, and implementation of systems is discussed. A project concept is proposed, the implementation of which is subject to the principle "from a specific object to a real control system." The content of a project to develop a system for automatic stabilization of steady-state modes of a virtual object, the processes in which are subject to intuitively clear physical laws, is given.

Ключевые слова: интегрирование фрагментарных знаний, моделирование управляемых объектов, синтез алгоритмов управления, реализации систем.

Keywords: integrating fragmentary knowledge, modeling technical objects, synthesis of control algorithms, implementation of systems.

I. ВВЕДЕНИЕ

Преподаватели работают на будущее. Их интересует вопрос – что, как минимум, должны будут уметь инженеры, оканчивающие вуз примерно через пять лет? Ответ, относящийся к специалистам по направлению «Управление в технических системах» – разрабатывать и внедрять системы управления техническими объектами и технологическими процессами. Менее очевидно, как обучать этому в условиях непрерывных изменений – управляемых объектов и средств реализации систем автоматизации управления.

Мы редко обсуждаем методику обучения в ее изначальном смысле – как учить? В стремлении поспевать за быстро меняющимися технологиями автоматизации управления, учебные планы иногда дополняются новыми дисциплинами с «осовремененными» названиями. Сокращается время, выделяемое на фундаментальные дисциплины, размыается теоретический компонент образования, а обучение порой сводится к описанию прототипов, изложению «инструкций» решения типовых задач стандартными средствами промышленной автоматики.

Современные цифровые средства автоматизации позволяют реализовать самые смелые идеи в стремлении достичь сложные цели управления. Инструменты ком-

пьютерной имитации позволяют визуализировать поведение систем нетиповой структуры по моделям сложных классов – нелинейным, нестационарным, бесконечномерным и гибридным. В результате у некоторых специалистов создается впечатление о ненужности «классической» теории управления. Появляются публикации, декларирующие «новое» направление Model-Based_Design – проектирование, основанное на моделях [1–3].

Известно, что с самого зарождения теория автоматического регулирования становится наукоемкой дисциплиной, оперирующей символыми моделями, а ее методы имеют прочную математическую основу. Недоразумение объясняется тем, что основные методы теории управления ориентированы на модели систем с типовой структурой в виде обычных линейных дифференциальных (или разностных) уравнений с постоянными детерминированными коэффициентами (в англоязычной литературе – модели класса LTI – Linear Time-Invariant). Достоинство классической теории заключается в ее способности объяснять и предсказывать фундаментальные свойства поведения систем по моделям компонентов и структуре причинно-следственной связи между ними.

Логично также, что фундаментальные идеи теории систем с обратной связью, устойчивости динамических систем и инвариантности к возмущениям целесообразно излагать на простейших моделях. Эти знания необходимы и в случае систем нетиповой структуры, модели которых принадлежат сложным классам, но их недостаточно.

Частное решение уравнений динамики при конкретных начальных условиях и воздействиях среды позволяют констатировать свойства поведения полностью определенных систем – результатов синтеза. Однако углубленный анализ требует объяснения, почему свойства объектов и систем не удовлетворяют требованиям. При синтезе алгоритмов управления совершенно необходимо предсказать свойства поведения систем. Строго говоря, этого нельзя добиться многократным численным решением уравнений.

Проблема обучения обусловлена нетривиальностью сочетания классических методов и современных задач, методов, инструментов проектирования и средств реализации. Готовить будущих инженеров следует «на перспективу», к нетиповым решениям, учить системно мыслить, оценивать и соблюдать условия адекватности построенных ими математических и компьютерных моделей, знать границы применимости результатов, прививать вкус к принятию обоснованных решений.

Недостаточное внимание к системному подходу к проблеме управления приводит к фрагментарности знаний. Предполагалось, что знания студентов должны интегрироваться в выпускной работе (дипломном проекте). Однако массовый характер подготовки бакалавров привел к появлению выпускных работ, в которых не содержатся элементы поиска оптимальных решений, количественный анализ альтернатив, а принятые решения не основаны на теории и расчетах. Расчетные части дипломных проектов по автоматизации управления конкретными техническими объектами в лучшем слу-

чае начинаются от типовых математических моделей объектов и завершаются компьютерной имитацией систем с типовыми алгоритмами регулирования. Недостаточно обоснованы переходы от физического/технического объекта и требований к его состоянию к моделям и обратно – от моделей систем управления к их реализации.

Проблемы обучения имеют системный характер, ее не удается решить только дополнением учебных планов новыми дисциплинами. Необходимо интегрировать знания студентов по теоретическим методам синтеза систем управления и по средствам реализации на базе аппаратного и программного обеспечения систем промышленной автоматики.

Представляется, что содержательный, теоретический и прикладной компонент подготовки инженера удастся объединить, если студент разработает «сквозной» проект, причем, не обязательно в рамках выпускной работы. Учебный проект должен предусматривать выполнение всего комплекса процедур, подчиненных принципу «от конкретного объекта до системы управления». Наконец, защита проекта в лаборатории должна продемонстрировать способность реальной системы достигать цели управления с требуемыми показателями качества процессов.

В докладе обсуждается содержание такого проекта на примере простейшей задачи автоматической стабилизации установившихся режимов в виртуальном объекте – резервуаре с жидкостью. Процессы в объекте подчинены интуитивно ясным физическим законам. Это позволяет отвлечься от детального описания технологии процессов и конструкции объекта и сосредоточить внимание на задачах разработки системы управления. Стоит отметить преимущество объектов, выполненных по стандартам «виртуальной реальности» – безопасность, удобство эксплуатации, разнообразие примеров и относительно невысокая стоимость из-за простоты тиражирования.

II. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Основными требованиями к состоянию большинства технологических процессов являются инвариантность к возмущениям среды и устойчивость установившегося режима. Если выявлено, что требования не выполняются, то принимается решение об изменении свойств объекта без вмешательства в технологию процессов и конструкцию объекта – о создании системы управления.

Разработка систем автоматического управления складывается из следующих основных этапов (рис. 1):

- 1 – содержательный анализ проблемы;
- 2 – синтез управлений и алгоритмов регулирования (теоретический этап);
- 3 – реализация (прикладной этап).

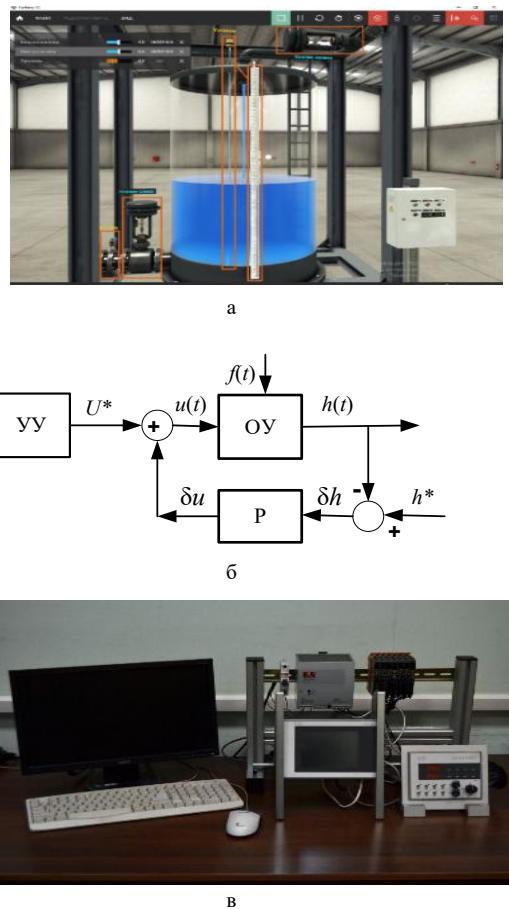


Рис. 1. Этапы разработки системы управления: а – технический объект; б – концептуальная модель системы управления и регулирования; в – стенд для натурных исследований системы

Этап системного анализа проблемы включает неформальное изучение физического объекта и требований к его состоянию, устанавливает доступность информации о состоянии объекта (наблюдаемость), оценивает степень влияния среды на состояние объекта и возможность оказания на объект контролируемых воздействий (управляемость). Результаты этапа: заключение о необходимости управления состоянием объекта; обоснование принципа управления; выбор подхода к автоматизации управления.

Технический объект, например, резервуар с жидкостью, дополненный измерительным элементом – датчиком уровня с цифровым выходом и исполнительным механизмом – клапаном притока с электроприводом, представляет *объект управления* (рис. 1,а). Таким образом, управляемый технический объект далее рассматривается как преобразователь данных/информации по некоторому алгоритму, а процесс разработки систем управления – как создание некоторой информационно-алгоритмической структуры.

Системы стабилизации установившихся режимов технических объектов часто используют прием декомпозиции (рис. 1,б) – управление U^* обеспечивает целевой режим h^* , а система регулирования с обратной связью обеспечивает инвариантность режима и устойчивость «в малом».

Второй, теоретический этап синтеза управляющего устройства УУ и алгоритмов регулятора Р (рис. 1,б) основан на математических моделях объекта, среды и требований к процессам достижения цели. Этап использует методы теории управления в виде аналитических, численных и графоаналитических методик, реализованных как программные инструменты.

Третий этап разработки систем автоматического управления посвящен реализации системы управления – программирования контроллеров, тестирования программ и испытания реальной системы (рис. 1,в).

Перечисленные этапы классического похода не удается непосредственно объединить в непрерывный процесс разработки системы управления. Необходимы этапы, связующие реальность с теорией и теорию с реальностью («интерфейсы»). С одной стороны – это моделирование объекта управления, воздействий среды и требований к процессам, с другой – подготовка результатов теории для программной и аппаратной реализации управляющего устройства и регуляторов.

Полезно ознакомить студентов и с другими походами к разработке систем автоматического управления.

Эмпирический подход к созданию систем управления отражает коллективный опыт создания и эксплуатации систем управления типовыми объектами. Этот подход реализуется в широко распространенных системах, реализующих принцип обратной связи – системах стабилизации температуры, уровня и др. с позиционными (релейными) алгоритмами, а также с типовыми PID-алгоритмами регулирования. Здесь разработка системы управления сводится к выбору аппаратуры и ручной настройке прикладного программного обеспечения на функционирующем объекте.

Экспертный подход к автоматизации управления применяется в специальных случаях, когда реальная система под управлением оператора функционирует удовлетворительно, а знаний об объекте недостаточно для его математического описания и синтеза алгоритма управления теоретическими методами. Подход основан на моделировании знаний и умения оператора. Для передачи автоматам интеллектуальных функций анализа и принятия решений обучают искусственные нейронные сети и механизмы вывода в нечеткой логике.

В учебном пособии [4] приведены примеры систем управления с релейными алгоритмами (в четкой логике), а также УУ в виде искусственных нейронных сетей и механизмов нечеткого логического вывода.

Далее иллюстрируется *классический* подход к разработке систем управления и регулирования, ориентированный на модели объекта. Этот подход в наибольшей степени отвечает целям обучения инженеров в области управления техническими системами.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Применение методов теории управления для синтеза систем управления требует абстрагирования от конкретной природы объектов и оперирования их моделями. Приведем пример виртуального резервуара с жидкостью (см. рис. 1,а), который реализуется программой Factory

И/О фирмы Real Games [5]. Установившиеся режимы истечения жидкости в резервуаре устойчивы и нет необходимости в дополнительных мерах их стабилизации. Но на объект действуют возмущения в виде неконтролируемого изменения степени открытия клапана стока, которые недопустимо отклоняют уровень от заданного значения.

Моделирование сводится к трансляции априорных знаний с языка предметной области на язык математики, к преобразованию принципиальной схемы в математическое описание требуемой формы. Принципиальная схема резервуара – символная модель на языке гидромеханики – изображена на рис. 2, где показаны основные переменные: $h(t)$ – уровень жидкости; $g_{\text{пр}}(t)$ – приток; $g_{\text{ст}}(t)$ – сток. Приток определяется степенью открытия клапана $u_k(t)$, которая зависит от напряжения $u(t)$, подаваемого на привод клапана. Сток зависит как от положения клапана стока v , так и от уровня жидкости (напора).

Согласно принципу последовательного раскрытия неопределенности (А.А. Вавилов [6, 7]) построение модели объекта управления – это процесс повышения ранга модели R :

$R = 0$ – перечисление множества компонентов;

$R = 1$ – причинно-следственная связь компонентов – модель топологического ранга;

$R = 2$ – модель структурного ранга;

$R = 3$ – полностью определенная модель параметрического ранга.

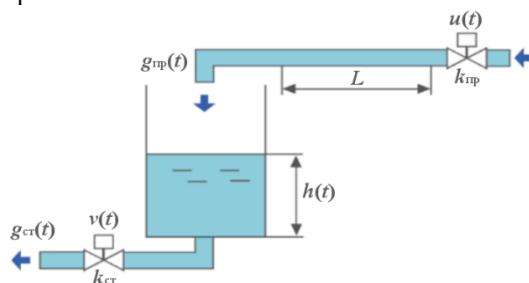


Рис. 2. Принципиальная схема резервуара

Резервуар представляется как причинно-следственная связь компонентов направленного действия, влияние которых на свойства объекта необходимо учитывать. Это дает модель топологического ранга ($R = 1$).

Компоненты модели рассматриваются как операторы преобразования переменных, несущих информацию о процессах входа и выхода. Ориентированность связей компонентов направленного действия отражает информационно-алгоритмический подход к построению моделей теории управления и отличает модели объектов и систем управления от структурированных моделей физических систем механической, электрической или другой природы.

Структуры операторов компонентов назначаются исходя из законов природы, которым подчиняются процессы в компонентах:

$$S \frac{dh(t)}{dt} = g_{\text{пр}}(t) - g_{\text{ст}}(t), h(0); \quad (1)$$

$$g_{\text{ст}} = k_{\text{ст}} v \sqrt{h}; \quad (2)$$

$$g_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} u_k(t - \tau); u_k(-\tau, 0); \quad (3)$$

$$T_{\text{пр}} \frac{du_k(t)}{dt} + u_k(t) = F(u); u_k(0). \quad (4)$$

Раскрытие неопределенности о структурах операторов компонентов резервуара (1)–(4) дает модель структурного ранга ($R = 2$) с параметрами в символьном виде (рис. 3).

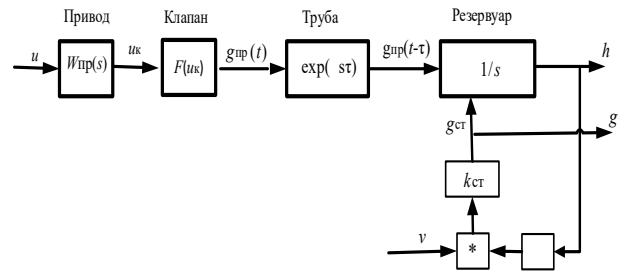


Рис. 3. Причинно-следственная структура модели резервуара

Коэффициенты клапанов $k_{\text{пр}}$ и $k_{\text{ст}}$, постоянную времени привода $T_{\text{пр}}$ и величину запаздывания τ нельзя рассчитать аналитически; они подлежат оцениванию путем обработки данных экспериментов – идентификации. Полностью определенная модель резервуара ($R = 3$) на языке графического редактора Simulink представлена на рис. 4:

$$k_{\text{пр}} \approx 0.0074; k_{\text{ст}} \approx 0.0061; T_{\text{пр}} \approx 0.2 \text{ с}; \tau \approx 1 \text{ с.}$$

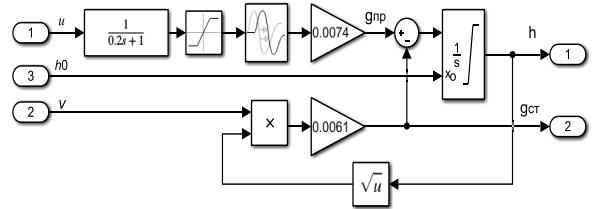


Рис. 4. Компьютерная модель резервуара

Модель объекта нелинейна из-за квадратичной зависимости стока от уровня (2), она бесконечномерна из-за транспортного запаздывания (3), содержит переменные непрерывного и дискретного времени вследствие выборочного характера измерения уровня (модель разнородна или, как говорят, гибридна).

IV. СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЙ И АЛГОРИТМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Управляющее воздействие U , обеспечивающее заданный уровень жидкости h при отсутствии возмущений (см. рис. 1,б), рассчитывается по формуле [4]

$$U = \frac{k_{\text{ст}}}{k_{\text{пр}}} \sqrt{h} v. \quad (5)$$

Синтез системы регулирования представляет последовательный выбор: 1 – места включения регулятора (топологии системы); 2 – типа регулятора (структуры алгоритма регулирования); 3 – параметров регулятора [6]. Задачи решаются по моделям системы соответствующих рангов: топологического ($R = 1$), структурного ($R = 2$) и параметрического ($R = 3$), т. е. с привлечением только необходимой и достаточной информации, что отвечает важнейшему принципу системологии – принципу неизбыточности.

Разработка системы управления, основанная на многократном компьютерном анализе системы, образованной исходной моделью объекта (нелинейной гибридной, с запаздыванием) и типовыми алгоритмами регулятора, имитирует эмпирический подход. Этот прием эффективен, если ранее выбраны топология системы и типы регуляторов, а ищутся значения небольшого числа параметров в известных интервалах. Прием уменьшает трудоемкость последующей подстройки регуляторов на реальном объекте. Можно предположить, что практические успехи такого подхода дают основание авторам публикаций (см., например, [1–3]) говорить о «новом» направлении Model-Based_Design – проектировании, основанном на моделях.

В случае принципиально новых проектов, когда не известны типы алгоритмов управления или даже топология систем (места включения регуляторов), синтез путем многократного численного решения уравнений системы становится нереально трудоемким. Принципиально то, что подход не дает ответа на фундаментальные вопросы существования и единственности решения. Исходная неопределенность решений – выбор топологии системы и типа регулятора – преодолевается с помощью методов теории автоматического регулирования, разработанных для моделей класса LTI – Linear Time-Invariant – классу обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Исходная модель резервуара принадлежит сложному классу, для которого не применимы аналитические методы синтеза. Единственным способом анализа процессов является численное решение системы нелинейных дифференциально-разностных уравнений с запаздывающим аргументом – компьютерная имитация Simulink-модели (см. рис. 4). Но если ограничиться режимами, когда клапан притока находится в линейной зоне, а модель резервуара линеаризовать в предположении о малости отклонений переменных от выбранного установившегося режима, игнорировать запаздывание и не учитывать дискретность времени и квантование уровня в измерительном элементе с цифровым выходом, то модель объекта упрощается до принадлежности классу LTI.

Косвенно учитывать влияние транспортного запаздывания и выборочного характера измерения переменных на процессы регулирования позволяет синтез в комплексно-частотной области по моделям в форме передаточных функций (ПФ) и частотных характеристик (ЧХ). Важно, что частотная область позволяет контролировать диапазон частот адекватности моделей и косвенно учитывать запаздывание. Транспортное запаздывание вводят в контур регулирования отрицательный фазовый сдвиг – от π рад, уменьшающий фактический запас устойчивости системы. Примем, что влияние запаздывания приемлемо, если оно уменьшает запас устойчивости по фазе $\Delta\phi = -\pi + \phi(\omega_{cr})$ не более, чем на 0.1 рад (около 5 град). При значении запаздывания $\tau = 1$ с это условие ограничивает частоту среза контура регулирования значением $\omega_{cr\ max} = 0.1$ рад/с.

Выборочным характером измерения уровня можно пренебречь, если на частоте выборки $\omega_s = 2\pi/T_s$ усиление контура мало. При значении $T_s = 0.1$ с частота выборки $\omega_s \approx 6.28$ рад/с оказывается в области малых усилий, что практически не влияет на устойчивость системы.

«Подгонка» исходной модели под методы и инструменты, ее упрощение, естественно, ограничивает области адекватности модели по амплитуде (малыми отклонениями от выбранного режима) и по частоте. Соответственно, при реализации системы вынуждены учитывать ограниченность результатов синтеза по упрощенным моделям.

Топологический синтез в примере регулирования уровня в резервуаре тривиален, так как нет выбора – имеется единственный датчик уровня и единственный исполнительный орган – привод клапана притока. Контуру является топологическим условием ослабления влияния не только сигнальных (аддитивных) возмущений, но и вариаций характеристик объекта – параметрических (мультипликативных) возмущений. Чем больше усиление контура на частотах возмущений, тем эффективнее ослабление влияния возмущений, спектры которых принадлежат этому диапазону.

Топологический синтез не требует знания структуры (типа) регулятора. Но если топология системы выбрана неверно, то никакой алгоритм регулирования не позволит добиться требуемых результатов.

Структурный синтез системы регулирования – выбор типа регулятора выполняется по модели резервуара со свернутой структурой в форме ПФ

$$W_0(s; h, v) = \frac{k_o(h, v)}{(T_o(h, v)s+1)(T_{np}s+1)}. \quad (6)$$

Коэффициент усиления и постоянная времени модели объекта второго ранга неопределенности M_0 (2) зависят от установившегося уровня h и степени открытия клапана стока v :

$$k_o(h, v) = \frac{k_{np}}{k_{ct}} \cdot \frac{2\sqrt{h}}{v}; T_o(h, v) = \frac{2\sqrt{h}}{k_{ct}v} = k_o(h, v)/k_{np}. \quad (7)$$

Синтез по условию селективной инвариантности. Известно, что обратная связь не позволяет добиться абсолютной инвариантности к воздействию, о котором нет никакой информации. Требованиям практики отвечает свойство селективной инвариантности – независимости установившейся реакции системы на конкретный тип воздействия. Тип воздействия определяют полюсы его изображения (спектр). Переменная селективно инвариантна к возмущению, если ПФ регулятора, место включения которого выбрано по правилам топологического синтеза, имеет полюсы, равные спектру воздействия [8]. Таким образом, структурный синтез – выбор типа регулятора по требованию селективной инвариантности сводится к назначению полюсов ПФ регулятора, играющего роль внутреннего компенсатора возмущения. Это соответствует принципу «внутренней модели», который утверждает, что «хорошая» система должна включать модель среды [9]. Заметим также, что свойство селективной инвариантности *робастно* – ус-

становившаяся ошибка равна нулю при любой амплитуде воздействия и любых значениях некоторых параметров системы.

Структурно-параметрический синтез системы стабилизации режима представляет последовательное удовлетворение противоречивых требований инвариантности к возмущениям и устойчивости. На рис. 5 иллюстрируется «эволюция» логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) контура регулирования [4].

В интервале частот от 0.001...100 рад/с показаны примеры асимптотических ЛАЧХ.

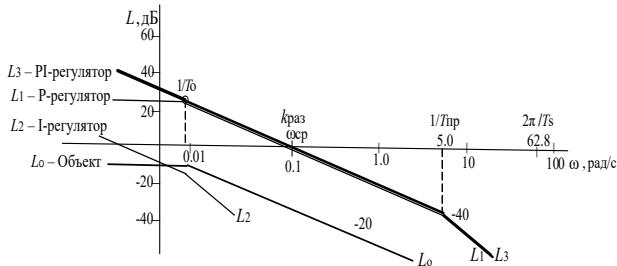


Рис. 5. ЛАЧХ контура

ЛАЧХ модели объекта (6), линеаризованного для режима $(h, v) = (1.5, 6.1)$ по формулам (7): $k_0 = 0.49$; $T_0 = 120$ с помечена как L_0 .

ЛАЧХ контура с Р-регулятором – L_1 . Параметр настройки выбран по критерию максимизации частоты среза $\omega_{ср}$ при ограничении запаса устойчивости по фазе $\Delta\phi$. С учетом запаздывания частота среза контура $\omega_{ср}$ не должна превышать 0.1 рад/с. Это ограничивает усиление контура на уровне 25 дБ (около 17). Р-регулятор с настройкой $k_p = 1/T_0 = 34$ обеспечивает селективную инвариантность до ϵ . Амплитуды установившихся реакций на воздействия с частотой не выше $1/T_0$ ослабляются примерно в 18 раз.

L_2 – ЛАЧХ контура с I-регулятором. Интегратор – «внутренний компенсатор» постоянных воздействий обеспечивает астатизм – нулевую установившуюся ошибку воспроизведения/подавления (абсолютную селективную инвариантность). Усиление (добротность по скорости) контура крайне мало из-за значительной инерционности объекта.

L_3 – ЛАЧХ контура, нуль ПФ которого $-1/T_0$ компенсирует доминирующий полюс ПФ объекта.

Если результат последнего шага удовлетворителен, то получится ПФ регулятора с настройками в символьном виде

$$W_p(s; h, v) = \omega_{cp}/k_0(h, v) \cdot \frac{T_0(h, v)s + 1}{s} = k_{PI} \frac{T_{PI}s + 1}{s}. \quad (8)$$

Каждый из множества линейных PI-регуляторов (8) гарантирует инвариантность и устойчивость «в малом» своего установившегося режима с параметрами (h, v) .

Этап синтеза завершает компьютерная имитация системы, образованной исходной моделью объекта (см. рис. 4) и регулятором (8). Оцениваются размеры области притяжения режима (устойчивость «в большом») и корректность упрощений (игнорирование ог-

раничений клапана притока и косвенного учета запаздывания). Уточняется период выборочного измерения уровня по ЛАЧХ L_3 (см. рис. 5).

Синтез всережимного регулятора. Регулятор, настроенный на конкретный режим, может не справиться с задачей стабилизации других режимов. Предложен ряд способов реализации многорежимных контроллеров [10–12].

Строго говоря, всережимный регулятор (8) не может быть в точности реализован на основе линейных регуляторов для локальных режимов. Это объясняется тем, что его настройки зависят от параметров установившихся режимов, а доступны данные только о текущих значениях переменных системы. Приближенное решение основано на принятии гипотезы о медленном изменении режимов, когда подстройка регулятора по текущим значениям переменных обеспечивает устойчивость и инвариантность всех установившихся режимов.

Алгоритм подстраиваемого всережимного регулятора включает:

- расчет управляющего воздействия по формуле (5);
- вычисление параметров линеаризованного объекта по формулам (7);
- по формуле (8) вычисление настроек PI-регулятора, ПФ которого преобразована к виду

$$W_p(s; h, v) = k_{PI}(h, v)[T_{PI}(h, v) + \frac{1}{s}];$$

- вычисление параметра v по уравнению (2), связывающему измеренные значения стока g_{ct} и уровня (*идентификация*) объекта.

Оценить допустимые скорости изменения режимов можно только в результате вычислительных экспериментов. Компьютерная модель всережимного контроллера представлена на рис. 6.

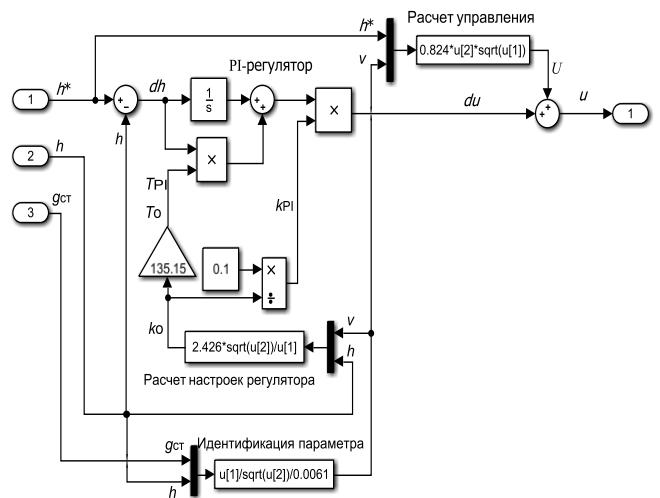


Рис. 6. Simulink-реализация всережимного контроллера

Этап синтеза завершается компьютерной имитацией системы управления (рис. 7), образованной исходной моделью объекта (см. рис. 4) и всережимным контрол-

лером (см. рис. 6). Согласно терминологии, принятой в работе [13], это отвечает тестированию MiL (Model-in-the-Loop – модель контроллера в контуре).

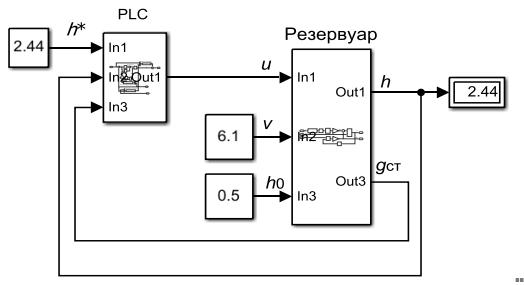


Рис. 7. Simulink-реализация системы регулирования уровня

Результаты компьютерной имитации системы всережимного PI-регулирования – переходные процессы в «крайних» режимах показаны на рис. 8 жирными линиями. Для сравнения тонкими линиями показаны процессы в «крайних» режимах с регулятором, рассчитанным на «средний» режим ($h, v = (1.5, 6.1)$).

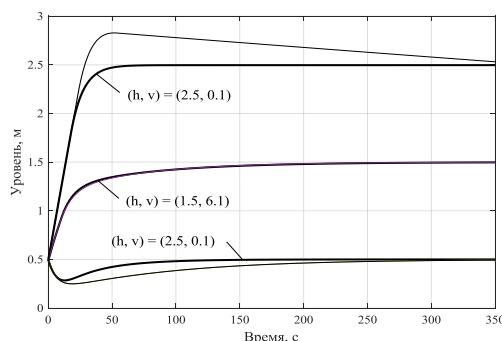


Рис. 8. Процессы управления и регулирования

Все процессы при одном и том же начальном уровне 0.5 м асимптотически стремятся к заданным значениям – статическая ошибка равна нулю. Действительно, PI-регуляторы являются всережимными в узком смысле – обеспечивают нулевую статическую ошибку любого режима. Подстройка регулятора обеспечивает устойчивость режима и улучшает качество переходных процессов.

V. РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ КОНТРОЛЛЕРА

Завершающие действия по разработке системы управления сводятся к исследованию на полнатурном стенде системы, образованной программной моделью контроллера и «виртуальным» объектом.

Инструмент Simulink PLC Coder позволяет автоматически генерировать код в ST формате по Simulink-модели контроллера (рис. 6). Согласно работам [13] это отвечает тестированию SiL (Software-in-the-Loop – программная модель контроллера в контуре).

После программирования контроллера и сопряжения с объектом – тестирования PiL (Processor-in-the-Loop) – следует анализ «реальной» системы управления и регулирования на натурном стенде [4, 14] (см. рис. 1,в). Это отвечает тестированию HiL (Hardware-in-the-Loop).

Аппаратно-программный стенд – виртуальный объект в среде FACTORY I/O фирмы Real Games [5] и инструменты MATLAB/Simulink фирмы The MathWorks, Inc.

размещены на персонально компьютере. Использован ПЛК B&R PP065 австрийской фирмы Bernecker&Rainer Industrie-Elektronik GmbH.

Для сопряжения компонентов стенда – резервуара в среде Factory I/O, программ MATLAB/Simulink и программы Automation Studio использован сервер OPC UA [14].

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методическое обеспечение «сквозного» проекта подчинено принципу «от конкретного объекта до реальной системы». Проект завершается реализацией систем управления – сопряжению контроллеров и компьютерных имитаторов среды функционирования с виртуальным объектом и анализом способности систем к достижению поставленной цели с требуемыми показателями качества процессов.

Студенты познакомятся с разными подходами к автоматизации управления техническими объектами, способами построения модели управляемого объекта. Они должны освоить современные методы и инструменты анализа и синтеза систем автоматического регулирования, а также научиться реализовать простейшие алгоритмы управления аппаратно-программными средствами промышленной автоматики. В результате выполнения последовательности заданий обучающиеся должны получить целостное представление о процессе разработки систем автоматического управления.

Авторы надеются, что успешное выполнение цикла заданий убедит будущих разработчиков систем автоматического управления в полезности математических моделей объектов, укрепит их доверие к методам теории управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деменков Н.П. Модельно-ориентированное проектирование систем управления // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. № 11. – С. 66-69.
2. Журавлев С.С., Рудометов С.В., Окольнишников В.В., Шакиров С.Р. Применение модельно-ориентированного проектирования к созданию АСУ ТП опасных промышленных объектов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 56-67.
3. Джонс Д., Брайан Маккай. Модельно-ориентированное проектирование систем управления: моделирование и тестирование до реализации в аппаратуре // Control Engineering Россия. – 2013. – № 5. – С. 64-66. – URL: <https://rucont.ru/efd/437938> (дата обращения: 18.07.2024).
4. Имаев Д.Х., Кораблев Ю.А., Крылова Е.Л., Немудрук М.Л., Новожилов И.М., Федоров М.С., Шестопалов М.Ю., Щуров Д.А. Разработка систем управления на базе средств промышленной автоматики: учеб. пособие. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – 172 с. – ISBN 978-5-7629-3286-8.
5. Factory I/O. – URL: <https://docs.factoryio.com/> (дата обращения: 15.04.2024).
6. Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. чл.-кор. АН СССР А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение, 1983. – 416 с.
7. Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Машинные методы расчета систем управления. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 232 с.
8. Имаев Д.Х., Квашнин С.В., Шестопалов М.Ю. Топологический синтез селективно инвариантных систем управления// Известия СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 7. – С. 44-48.
9. Юнэм М. Линейные многомерные системы управления. Геометрический поход. – М. Наука, 1980. – 375 с.

10. *Петров Б.Н., Александров А.Д., Андреев В.П. и др.* Многорежимные и нестационарные системы автоматического управления / под ред. акад. Б.Н. Петрова. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
11. *Филимонов Н.Б.* Системы многорежимного регулирования: концепция, принципы построения, проблемы синтеза // Известия вузов. Приборостроение. – 1988. – № 2. – С. 18-33.
12. *Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б.* К вопросу синтеза систем многорежимного регулирования / JARiTS. 2020 Issue 18. – <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2020-18-41-49> (дата обращения: 08.04.2024).
13. *Murphy B., Wakefield A.* Early verification and validation using model-based design. The MathWorks. – 2009. – URL: <https://www.edn.com/design/integrated-circuit-design/4313371/Early-verification-and-validation-using-model-based-design> (дата обращения: 08.07.2024).
14. *Каплун Д.И., Крылова Е.Л., Немудрук М.Л., Федоров М.С.* Аппаратно-программные комплексы систем автоматизации и управления: учеб. пособие. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – 117 с. – ISBN 978-5-7629-2998-1.

Проблема самоорганизации человекоразмерных систем: пост-неклассический взгляд

Непомнящий Анатолий Владимирович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
nepomnyashchiy@sedu.ru

Аннотация. Цель работы – рассмотреть основные аспекты проблемы самоуправления – самоорганизации, самоконтроля и саморегуляции – в человекоразмерных системах в контексте их современного и вероятностного перспективного состояния. Показано, что ключевым аспектом самоуправления является этап самоорганизации, включающий зарождение организации и её последующее развитие в условиях динамики внешнего управления, что и является источником проблемы самоорганизации. Предлагаются пути её решения.

Abstract. The purpose of the work is to consider the main aspects of the problem of self-government, self-control and self-regulation in human-sized systems in the context of their modern and probabilistic perspective state. It is shown that the key aspect of self-government is the stage of self-organization, including the birth of the organization and its subsequent development in the context of the dynamics of external management, which is the source of the problem of self-organization. Solutions are proposed.

Ключевые слова: человекоразмерные системы, генезис, самоорганизация, самоконтроль, саморегуляция, мировые универсалии, развитие.

Key words: *human-sized systems, genesis, self-organization, self-control, self-regulation, world universals, integral vision. development.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Мир Земли и Космос постоянно демонстрируют непрерывную динамику своего состояния. Только в последние века истории человечества, произошло множество событий, которые оставили неизгладимый след в сознании их участников, вне зависимости от того, осознавались эти события ими или нет. В первом варианте восприятия они заставили людей усомниться в, казалось бы, незыблемой картине мира, созданной в лоне классической науки её идеологами, тяготеющими к торможению научной мысли. А в целом, – привело к качественным, но неосознаваемым изменениям в системах «человек-человек», «человек-техника», человек-социальная среда», «человек-среда обитания», которые принято называть человекоразмерными или человекомерными системами.

Смысловые значения этих двух понятий, при детальном рассмотрении, не синонимичны и далеко не всегда трактуются однозначно, но всегда с некоторым, подспудным атропоцентрическим акцентом, исходящим из идеи классической науки о том, что человек – есть венец мироздания, – т.е. его размерность или мерность (сложность) превышает мерность всего сущего на Земле, а потому и система, включающая в себя человека, всегда получает статус соответствующей ему по мерности. И это, конечно, в системах «человек-техника» имеет место, поскольку мерность человека пока не определена, а мерность технических систем определима и описывается языком математики. Но и здесь есть претензии провайдеров искусственного интеллекта (ИИ) обеспечить его превосходство над человеком по широкому кругу задач уже к 2030 году [1]. Кроме того, существует множество других систем заведомо большего порядка, которые существуют в силу принципа иерархии в мироустройстве и того факта, что человек есть всего лишь звено в иерархии космического разума, и это звено далеко не самого высокого порядка – уровня развития.

Но, каковы бы не были представления человека о нём самом, о его размерности (трехмерность, четырёхмерность или выше) и о размерности систем, его включающих, события на уровнях мега- и макрорегулирования (Космоса и Земли) не дают ему никаких шансов сохранить незыблемым своё актуальное состояние. Достигнутый результат самоорганизации (гомеостаз и информационный метаболизм) периодически превращается в хаос, чтобы на его «пепелище» затем возникло нечто новое – новая «самоорганизация» – следствие нового порядка на уровне макро-регуляции, обусловленного изменениями на уровне мега-регуляции [2]. Отсюда и вытекает проблема: а существует ли самоорганизация как таковая, или это гипотетические предположения синергетиков, не видящих утончённых форм внешнего управления с мега и макроуровней, а наблюдающих только его объективно доступный результат в виде якобы «само» зарождения нового или изменения структуры «старого»?

II. ГЕНЕЗИС ПРОБЛЕМЫ

История зарождения и развития человека на Земле, а вместе с ним и рассматриваемой проблемы, исчисляется как это следует из мега-источников, несколькими «днями» Бога (по Библии), или «днями» Брахмы – по Восточной, «вечной» философии, положения которой не изменяются со временем в силу их истинности [3]. И, если Библия не разъясняет продолжительность «дня Бога», поскольку в Начале Божественного творчества ещё не было ни самой Земли, ни земного летоисчисления, то «Вечная философия» в ряде своих источников [4 и др.] определяет его длительность в 4,32 млрд. земных лет, что исключает возможность полностью показать в объёме настоящей статьи генезис сформулированной выше проблемы и приводит к необходимости сократить рассматриваемый период до обозримого интервала, например, до пяти веков – периода зарождения и развития в современной цивилизации научного знания, а с ним, затем, и синергетики, и проблемы самоорганизации.

В жизненном контексте последних веков одним из самых примечательных событий в философии и науке XVII-го в. стало написание и публикация труда английского лорда Ф. Бэкона «Новый органон» [5], разъясняющего сущность «нового» универсального средства познания, предназначенного для инструментального обеспечения объективного способа познания мира. И его «новизна», и сущность заключалась в положении о том, что познать Природу можно только с помощью внешних средств вспоможения – своего рода органопроекций человека, – например, с помощью телескопов и микроскопов, как проекций (продолжений) органов зрения, можно исследовать удалённые космические объекты и чрезвычайно малые объекты, незаметные для неооружённого человеческого глаза. Таким образом в зарождающейся науке западного образца и был введён в обязательное научное использование объективный способ познания, предполагающий несовершенство человека и его собственных когнитивных возможностей. А для закрепления результата, всё, что не могло быть обнаружено и изучено объективно, т.е. с помощью сенсорного восприятия, приказано было считать не существующим.

Почему Ф. Бэкон назвал свой способ познания мира «Новым Органоном» и зачем он понадобился западно-ориентированной цивилизации? Во-первых потому, что до него в философии был известен другой универсальный способ познания, получивший название «Органон» Аристотеля [6], суть которого заключалась в отождествлении субъекта познания с объектом познания, т.е. в использовании человеческого ума (сознания) познающего в качестве универсального инструмента познания, путем отождествления этого ума с объектом познания, как это разъясняли Г.В.Ф. Гегель, Л.Н. Толстой и другие философы Востока и Запада. Из этого и последовало, в науке и философии, определение этого способа познания как субъективного способа (от слова «субъект» – управитель). Во-вторых, Новый органон понадобился «воспитателям» современного человечества для того, чтобы помочь человеку перейти от мифической стадии в развитии его ума и разума, к рациональности, поскольку на пути развития никто не может «перешагнуть» через одну или несколько ступеней – стадий развития, – на каждой из которых должен быть достигнут баланс зна-

ния и бытия, только после чего и возникает понимание – своего рода завершающий этап в освоении каждой стадии [7].

В плане решения проблемы существования самоорганизации ни первый, ни «новый» органоны не могут обеспечить её доказательное существование по следующим причинам.

Субъективный способ позволяет познать исследуемый объект интегрально, т.е. во всей его многомерности, поскольку сознание человека интегрировано в сознание вселенной и всего сущего в ней, на что указывают нелокальность квантовых эффектов, теория и практика религий «чистого опыта» [8]. Но этот способ не обладает необходимой доказательностью для масс – для тех умов и сознаний, которые ещё, в силу своего недостаточного развития, не могут отождествить себя с познаваемым объектом и проверить, тем самым, результат.

Попытки же самого Аристотеля повысить доказательность субъективного способа средствами науки логики и герменевтики [6] особого прогресса в достижении доказательности не дали и не могли дать, что в первой половине XX-го в., математически точно показал К. Гёдель, путём доказательства своей теоремы «О неполноте», из которой следует, что в языке ограниченной или условно замкнутой системы может существовать истинное утверждение, но его истинность средствами языка этой системы не может быть доказана [9].

Что касается объективного способа познания, то он подпадает под действие всё той же теоремы К. Гёделя, поскольку объективными средствами – средствами мира конечных объектов, мира форм (реальности, веществности) нельзя описать бесконечное – то, что управляет этими формами, их сознание, т.е. действительность, в целом. Таким образом, классическая наука, опирающаяся только на объективно регистрируемые явления сути, на органон Ф. Бэкона, теоретически не могла описать саму суть исследуемого, находящуюся в системе более высокого порядка, уже потому, что в её парадигме (законе сохранения массы вещества во вселенной) других субстанций, могущих участвовать в процессах самоорганизации сущего, ещё не существовало и нет и поныне.

Именно поэтому и синергетика появилась только в лоне пост-неклассической науки, в парадигме которой, кроме вещества, появились и другие субстанции – энергия и информация. При этом, у понятия «информация», в семантическом поле его смысловых значений, присутствует более ста дефиниций, из которых самое упрощенное – совокупность данных (текстов того или иного языка). Это простейшее определение нами не может быть использовано, поскольку текст не является субстанцией мироздания, а стало быть, и не может быть использован в формуле закона сохранения. Определение информации как субстанции, адекватное закону сохранения, – это библейское «Слово», которое, согласно Евангелию от Иоанна, было у Бога, и которое было Бог. «Все чрез Него начало быть, и без Него ничто не начало быть, что начало быть» [10]. В современной интерпретации – это мысль, которая согласно вечной философии, правит миром, или сознание (Дух), которое управляет всеми формами и из которого всё и происходит, согласно философии Буддизма [8].

Собственно, понимание этого факта в науке, как показал в своей работе Т. Кун [11], и привело во второй половине XX-го в. к очередной революции в науке и к переходу её авангарда с парадигмы (теоретико-методологического основания) науки неклассической, включившей в начале XX-го в. в закон сохранения субстанцию «энергия», на парадигму науки пост-неклассической, обнаружившей информацию как субстанцию и включившей её в обобщенную формулу закона сохранения. Это привело и к появлению методологии интегрального видения, разработанной американским философом и мастером транспersonальной психологии К. Уилбером, подарившем современному человечеству, на момент написания этого текста, 30 книг, содержащих детальное описание этой фундаментальной методологии, гармонично и не противоречиво объединившей в себе оба универсальных средства познания – и органон Аристотеля и Новый органон Ф. Бэкона. Это непротиворечивое объединение и позволило К. Уилберу назвать свою методологию «интегральным видением» [12].

Здесь необходимо остановиться на её основных положениях, без чего логический анализ генезиса рассматриваемой проблемы не представляется возможным.

Иерархически высшим принципом методологии интегрального видения является принцип иерархии мироустройства, имеющий статус мировой универсалии – универсального закона всего мироздания. Хотя с позиции пост-неклассической науки он представляется очевидным, многие «учёные» из области постмодернизма в науке и философии прилагали в своё время (эксперимент в США по управлению массами с помощью концепции обособленности и противостояния) все усилия для доказательства того, что иерархии существуют только в системе зла и тоталитарных режимов, а на самом деле каждая личность может иметь своё уникальное истинное мнение по любому вопросу, вплоть до ответа на вопрос: «Сколько будет дважды два?» [13, 14]. Но постмодерн в США просуществовал недолго, поскольку общество деградировало с такой скоростью, что это испугало даже экспериментаторов. И им пришлось смириться и с правом на жизнь методологии интегрального видения, и с существованием её автора. Но, это было не просто, потому и один из основополагающих трудов К. Уилбера и получил название: «Око духа: интегральное видение для слегка свихнувшегося мира» [12].

Из принципа иерархии (буквально – управления сверху) следует принцип взаимосвязи всего сущего, поскольку любая особь (цельность), как звено иерархии цельностей, содержит в себе особи меньшего порядка сложности и, в то же время, сама входит в состав особи более высокого порядка сложности. Для обеспечения гармоничного взаимодействия в этой тотальной связности есть только один способ – функциональное соответствие. Например, если у всех клеток биологического тела человека есть совесть (соединяющая весть) и стремление к совместному бытию, они безусловно исполняют свои функциональные обязанности и всё тело находится в здоровом и работоспособном состоянии. В противном случае в теле появляются новообразования, часто превращающиеся в злокачественные, вследствие чего биологическое тело человека может не пройти эту, своего рода, точку бифуркации и с помощью энтропии превратиться в хаос, т.е. умереть. И так происходит в любой системе и не только в человекоразмерной.

Но, самое важное, что необходимо отметить, это факт неизбежной гибели того звена иерархии, которое вызвало такие последствия. Нарушившая функциональное соответствие клетка гибнет либо под воздействием иммунной системы человека, либо от ножа хирурга, либо вместе с телом. Как говорит другая мировая универсальность, подтверждающая закон взаимосвязи всего сущего (причинно-процессно-следственный закон) – «что посешь, то и пожнёшь». Это закон самосохранения и саморазвития любой иерархической структуры и человека, в том числе. На основе этого закона и построены все практики самовосстановления и саморазвития [15], т.е. «самоорганизации-самоконтроля-саморегуляции» человека, путем осознанности происходящего и отождествления своего «Я» со своей высшей управляющей системой – со своим сознанием, со своим триединым духом [16]. Но, для обеспечения успешности этих практик самоорганизации второго вида (структурно-элементное совершенствование уже организованной цельности) необходимо восстановление функционального соответствия себя той цельности более высокого порядка, в которую человек входит в качестве одного из элементов, дабы иметь поддержку этого метарегулятора.

Для иллюстрации этого положения обратимся к рис. 1, где показана модель интегрального видения.



Рис. 1. Методологическая модель интегрального подхода с системой критериев достоверности

Эта модель также может рассматриваться и как иллюстрация к многогранному принципу иерархии мироустройства, и как иллюстрация к непротиворечивому использованию субъективного и объективного способов познания. Но главная смысловая содержание этой модели содержится в следующих положениях.

Человек всегда находится в четырёх пространствах своего бытия: в индивидуальном (два верхних сектора), в коллективном (два нижних сектора), в объективном (два правых сектора) и в субъективном (два левых сектора). В каждом секторе – свой язык описания и своя методология. Например, переносить в левые секторы системный и сетевой подходы ни теоретически, ни практически невозможно, поскольку в этих секторах нет границ [17], а стало быть, и нет ни систем, ни сетей, ни возможностей использования объективного способа

познания. Применение в этих секторах статистических методов исследования невольно наводит на мысль о Марке Твене, который вполне справедливо и доказательно сказал, что в науке есть ложь, наглая ложь и статистика, которая, надо понимать, ещё хуже наглой лжи. Левые секторы – это пространство действия органона Аристотеля и созерцательных практик [18], в правых секторах приемлем Новый органон Ф. Бэкона, его методы, методики и средства.

Пространство индивидуального, в нашем случае, отображает самого человека, а именно: объективно регистрируемую форму его существования и функционирования, в целом, и объективный аспект её составляющих, в отдельности (правый верхний сектор, «объективное Я»); субъективно регистрируемое сознание, управляющее этой формой существования (левый верхний сектор, именуемый «субъективное Я»), которое объективно не может регистрироваться и изучаться непосредственно, а фиксируется и изучается объективно мыслящей наукой только через явления этой сути в пространствах объективного.

Пространство коллективного отображает цельности более высокого порядка, в которые человек входит в качестве составляющего элемента. Оно включает в себя: коллективное, объективно регистрируемое «объективное Мы» (правый нижний сектор), являющееся той, или иной объективно вычленяемой системой, имеющей свои границы и составляющие её элементы, объединённые в систему для достижения общей цели; коллективное сознание этой системы – «субъективное Мы», представляющее собой полевую структуру, а потому и не имеющую границ, необходимых для объективного изучения. И всё это относится к любой особи, рассматриваемой как объект исследования способом интегрального видения, и к любым системам, поскольку, как уже обсуждалось, любая особь включает в себя особи меньшего порядка, а сама непременно входит в качестве составляющей в особи более высокого порядка.

Таким образом, функционирование любой особи непременно подпадает: под влияние внутренних управляющих воздействий, со стороны составляющих её особей меньшего порядка сложности; под влияние внешних управляющих факторов со стороны особи более высокого порядка, в которую рассматриваемая особь входит в качестве составляющего её элемента; наконец, под управление собственного сознания – собственной субъектности – как способности управлять собой. Это три неизбежно существующих управляющих фактора, чьё совместное функционирование с позиции классической науки и относится к процессам самоорганизации, самоконтроля и саморегуляции, без объяснения того, кто есть на самом деле этот «сам».

И это происходит потому, что классическая наука, считающая сознание функцией мозга, ничего, происходящего на высших стадиях науки объяснить не могла и никогда не сможет, в силу предельно ограниченных возможностей классической парадигмы и вытекающей из неё аксиоматики. Что касается современной синергетики, то, при внимательном рассмотрении её положений, можно и в них обнаружить проекции всех стадий развития науки и классики, в том числе. И это результат того, что в мире науки нет требуемого, однозначного и

принятого всеми мнения о том, что же есть та или иная стадия науки, в чём суть отличий её парадигмы, и какие ключевые маркеры, отличающие одну парадигму (стадию) от другой, хотя Т. Кун в своей фундаментальной работе о революциях в науке достаточно подробно всё разяснил [11]. Но его книга, фактически доказывающая существование «Бога», была запрещена в СССР 10 лет. Естественно, это привело к тому, что в заявительном порядке все «классики» современности, по принципу календарного соответствия, также относят себя к последователям минимум пост-неклассической стадии науки, что наглядно видно из их публикаций.

Подводя итоги рассмотрения генезиса проблемы самоорганизации в общем виде и с позиции интегрального видения, можно констатировать следующее. 1) Невозможно организовать закрытое взаимодействие двух каких-либо особей во вселенной. Всегда будет присутствовать третья сила. Этот закон имеет статус мировой универсалии и, как это было показано ранее, не только логически вытекает из основных положений методологии интегрального видения, но и из факта тринитарности проявления «Неизречённого в слове» (в силу его бесконечности) – иерархически высшего регулятора, именуемого условно Богом, Создателем, Творцом... Он проявляется в качестве трёх своих ипостасей: силы со-зидания, силы сохранения созданного и силы растворения созданного, как это поведал современному человечеству духовный лидер Индии, воплощённый Аватар, Шри Сатья Сай Баба [19]. Сила растворения обрела в физике имя «энтропия» и выступает испытателем прочности и совершенства всего созданного, проявляясь во всех формах и в человеческой тоже.

В силу принципа иерархии в мироздании, в любой тринитарной структуре, и даже в этой Божественной, невозможно установить точное равновесие (в плане управляющих возможностей), поскольку каждая из составляющих вынуждена находиться в непрерывном творчестве, ибо всё мироздание находится в непрерывном движении, откуда и фраза «движение – это жизнь!». Из этого следует, что статус иерархически высшего субъекта в любой рассматриваемой тринитарной структуре, динамичен и может во времени переходить от одной составляющей, к другой. Это и делает понятия «самоорганизация», «самоконтроль» и «саморегуляция» проблемными в плане определения субъекта этого процесса. Всегда остаётся открытый вопрос: «А «сам» – это кто?». Поскольку объективным способом познания (через корреляты) это точно определить теоретически невозможно, для такого определения необходимо только интегральное видение, позволяющее наблюдать динамические процессы не только в объективном, но и в пространстве субъективного, вместе с его субъектами (управляющими).

Таким образом, говоря о самоорганизации человеко-размерных систем, необходимо иметь представления о человеке, адекватные сложности рассматриваемых систем. То есть, необходима модель человека, соответствующая методологии интегрального видения и парадигме той стадии науки, с позиций которой ведётся рассмотрение, или с более высоких стадий. Последний вариант весьма проблематичен в реализации, поскольку каждая новая парадигма имеет свой понятийный аппарат и его интерпретации, отличающиеся от интерпрета-

ций других стадий развития науки. В силу этого дальнейшее рассмотрение обозначенной проблемы осуществляется с позиции парадигмы пост-неклассической науки и её аксиоматики.

III. ЧЕЛОВЕК КАК СУБЪЕКТ И ОБЪЕКТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

В силу того факта, что каждый человек современности имеет неповторимый опыт собственного развития, и даже в мире науки это многообразие взглядов, мнений, знаний и опыта не имеет ограничений, что не соответствует обещаниям науки быть точной, рассмотрение человека как субъекта (управляющего) или объекта (управляемого) не может быть осуществлено без описания понятийного аппарата и его дефиниций. Необходимо говорить с собеседником на одном языке и это язык пост-неклассической науки, в котором понятие «человек» имеет свой смысл, следующий из этимологии самого понятия «человек». Чело – в ряде древних и современных языков Востока, – это ученик, а век у наших пращуров был средним сроком жизни в одном теле, в форме одной личности. Сам «чело» бессмертен и может рассматриваться и как «индивидуальность» – триединый Дух (братья Розенкрайцеры), и как Искра Бога внутри каждого из нас (Христианство), и как эманация Бога, обретающаяся из века в век своей индивидуальный, неповторимый опыт (вечная философия), и как управляющая система в человеке – его сознание (Буддизм и пост-неклассическая наука) [20].

Эта дефиниция является необходимой, но недостаточной, поскольку человек многомерен и для того чтобы знать как он управляет и как управляется, необходимо знать, как минимум, его структурную организацию, которая в классической науке ограничивается описанием инструмента личности – его телесной, белково-нуклеиновой формы проявленного существования, чего, естественно, недостаточно, как недостаточно изучать автомобиль для того, чтобы узнать, что такое водитель.

Необходимые модели человека были разработаны тысячетелетия назад в различных школах бывших тайных, а ныне значительно открытых орденов [16 и др.]. Это открытие тайных знаний для современной западно-ориентированной цивилизации было обусловлено необходимостью подготовки человека к, своего рода, «промежуточной аттестации», названной Шри Ауробиндо «Часом Бога» [21].

Наиболее приемлемой для решения задач настоящей работы видится модель человека, предложенная в начале XX-го в. братом-мирянином ордена Розенкрайцеров М. Гендлем и опубликованная в его фундаментальном труде «Космоконцепция Розенкрайцеров» [16]. Согласно этой структурной модели, человек имеет семь уровней своей структурной организации, именуемых условно «телами». Три верхних, управляющих уровня («тела») – 1) Божественный Дух, 2) Жизненный Дух, 3) Человеческий Дух – образуют тринитарную структуру единого неделимого Духа, именуемого в Христианстве святой троицей: Бог Сын, Бог Отец, Бог Дух святой. Четвёртый уровень – тело мысли. Пятым – тело желаний (мотиватор). Шестой – жизненное (энергетическое) тело, состоящее из эфирной субстанции и непосредственно управляющее работой мозга. И наиболее проявлен-

ный седьмой уровень – биологическое тело человека. С этой модели «списаны» все приёмопередающие устройства и компьютерная техника, что подробно показано в работе [20].

Все эти тела столь сложны в своём устройстве и размерности, что обладают способностью к самоуправлению – самоорганизации, самоконтролю и саморегуляции, и тяготеют к взятию власти над всей структурой человека. И именно это создаёт проблему самоорганизации в человекоразмерных системах, поскольку у самого человека существует проблема самоидентификации самости. То есть, когда человек говорит сам «Я», то личности, как инструменту индивидуальности (четыре нижних уровня структуры человека), необходимо понимать, какое из тел в данном конкретном случае выступает под именем этого «Я». Осознание этого «Я» личностью зависит от уровня развития человека в целом – и его индивидуальности, и его личности.

Стартовой позицией в развитии человека является его самоотождествление со своим биологическим телом, что навязывается классическим мировоззрением и властолюбцами, дабы народом было легче управлять [22], превращая его в обслуживающий персонал человекоразмерных систем [23]. Это предельно эффективный, информационно-идеологический ход сил растворения, поскольку человек, думающий, что он живёт только одну жизнь, приходит «табула раса» (чистым листом, на котором, якобы, воспитатели пишут свою историю) и уходит удобрением для почвы, не имеет никакого другого смысла существования, кроме, как призывает реклама «пепси», взять от жизни всё, что доставляет радость его телесной форме или телу желаний.

В этом случае и происходит превращение человека из субъекта деятельности в её объект, а вопросы самоуправления и, в частности, самоорганизации узурпируются системой, в которую человек входит в качестве элемента, лишённого каких-либо возможностей к самоуправлению и саморазвитию. К счастью, попытки взять от жизни всё приводят только к страданиям, как говорит «вторая благородная истина Будды», и эти страдания рано или поздно наводят человека на мысль, что в этом мире не всё только телесно и управляемо желаниями. Так он постепенно и поднимается в отождествлении своей самости от самого грубого тела, к самому утонченному – по ступеням известной из Библии «лестницы Иакова» – к осознанию существования в себе единого Духа – той самой «Искры Божьей, которая есть в каждом из нас», как гласят все этические традиции мира и христианская, в том числе.

И только поднявшись на эту ступень, он становится способным к самоорганизации, самоконтролю и саморегуляции, становится субъектом своего жизненного пути и управляющим теми человекоразмерными системами, в которые он включается по свободе своей воли [24], данной каждой человеку Создателем, т.е. иерархией космического разума.

На всех предшествующих стадиях своего развития человек всегда находится в той, или иной степени под влиянием внешнего и внутреннего управления, как это было показано выше, т.е. имеет статус объекта в тех человекоразмерных системах, в которые он попадает по

причинно-следственному закону (закон кармы в восточной традиции) и по закону сохранения информации, который именуется в вечной философии законом судьбы.

IV. НЕИЗБЕЖНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ И КАК К НИМ ОТНОСИТЬСЯ

Современный «среднестатистический» индивид (воплощение индивидуальности) редко смотрит в небеса всеми своими очами познания [22], порой даже не подозревая, что кроме сенсорных систем и ока разума, способного при должном развитии видеть смысл в понятийных аппаратах и семантических системах, у него есть ещё и око души, видящее энергетическое пространство мира (его модель – мобильный телефон), и око духа, видящее сквозь время и пространство (т.н. интуиция). Поэтому он до сих пор не увидел, что его мегарегулятор (Солнце) перестал быть жёлтым карликом и стал тем самым «белым Солнцем», о котором говорили мистики в своём фильме «Белое Солнце пустыни». В спектре его излучения добавилось множество частот ниже пределов инфракрасного, и выше ультрафиолетового.

Это и другие изменения в мире мегарегуляторов привели к изменению порядка жизнедеятельности в области макрорегуляции, т.е. на Земле, а в плане микрорегуляции подвели к точке бифуркации множество живых существ из растений, насекомых, птиц, животных, которые были вынуждены средствами самоорганизации самоликвидироваться с проявленного земного плана.

Этот процесс не миновал и человека, чьи условия пребывания на Земле также претерпели кардинальные изменения, отобразившиеся в виде новых войн, пандемий, самоизоляции, обрушения тринитарной структуры социальной регуляции («нравственность – политика – экономика»), а вместе с ней и важнейших социальных институтов, в том числе и образования, которое более не транслирует только интегральные образы действительности, а редуцировано до трансляции цифровых симуляций, что уже приводит к явлению цифровой деменции у молодёжи, пропустившей момент зарождения и развития тех центров в мозге, которые изначально предназначены в человеке для обработки именно многомерных образов действительности и творческой деятельности [25].

Другим, незаметным для многих, изменением порядка стало то, что жизнь современного человека ныне жёстко связана с техногенной средой обитания. Даже если мы рассматриваем деревенского жителя, ближе горожан находящегося к природе, то видим, что сама эта деревенская природа уже не девственно чиста и самобытна, не говоря уже о самом деревенском человеке, который не готов расстаться с мобильным телефоном, телевизором, сельскохозяйственной техникой различной сложности и прочими средствами обеспечения «комфортной» жизни. Таким образом в массе своей человек потерял способность интегральной связи с природной средой, а вместе с этой утратой он потерял и способность к интегральному видению мира. Произошла тотальная объективизация его когнитивных процессов в восприятии мира, а вместе с ней и утрата способности к интегральному управлению собой и человекоразмерными системами. Апофеоз этих изменений – тотальная цифровизация жизнедеятельности и, с развитием систем искусственного интеллекта, тотальный перехват этим инструментом функций субъекта от человека, что лишит

его возможности развивать в себе творца и сделает его пребывание на Земле бессмысленным, что наглядно проявилось в эксперименте с самоизоляцией, смертность от которой в десятки раз превысила летальность от COVID-19.

Собственно, всё это и есть явления «Часа Бога» [21] – часа испытаний, о котором русский гений Ф.И. Тютчев ещё 170 лет назад писал: «Созрела жатва, жнец готов, настало время неземное...» [26, с.267]. Он же, в этом же стихотворении, дал и рекомендацию к тому, как человек должен отнестись к этому экзамену, в процессе которого внешние подсказки и «помощь» не предусмотрены и каждый должен сам доказать Экзаменатору свою способность к самоорганизации и к самоуправлению, в целом: «О, в этом испытанье строгое, в последней, в роковой борьбе, не измени же ты себе и оправдайся перед Богом...»

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность всем коллегам, способствовавшим публикации настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Совещание по вопросам развития технологий в области искусственного интеллекта, 30 мая 2019 г. в «Школе 21» Сбербанка [Электронный ресурс]. – <http://kremlin.ru/events/president/news/60630> (дата обращения: 16.05.2024 г.).
2. Буданов В.Г. Методология синергетики в постклассической науке и в образовании. – 3-е изд. испр. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 240 с. (Синергетика в гуманитарных науках).
3. Хаксли Олдос. Вечная философия: пер. с англ. Е.Д. Сыромятниковой. – М.: АСТ, 2014. – 478, [2] с. – (Новая философия).
4. Блаватская Е.П. Тайная Доктрина. Т. 1. ЭКСМО. – М., 2003. – 878 с.
5. Бэкон Ф. Сочинения в 2-х т. Т. 2. – 2-е исп. и доп. изд. Сост., общ. ред. и вступит. статьи А.Л. Субботина. – М.: Мысль, 1978. – 575 с.
6. Аристотель. Сочинения в четырёх томах. Т. 2 / Ред. З.И. Микеладзе. – М.: Мысль, 1978. – 687 с.
7. Успенский П.Д. Психология возможной эволюции человека; Космология возможной эволюции человека: пер. с англ. – СПб.: ИД «ВЕСЬ», 2001. – 192 с.
8. Лама Анагарика Говинда. Психология раннего буддизма. – СПб.: Изд-во «Андреев и сыновья», 1993. – С. 1-129.
9. Успенский В.А. Теорема Гёделя о неполноте. – М.: Наука. 1982. – 112 с.
10. Евангелие от Иоанна глава 1 [Электронный ресурс]. – <http://www.patriarchia.ru/bible/jn/> 24.06.2024.
11. Kuhn T.S. The Structure of Scientific Revolutions. – Chicago, 1962; Москва, 1975.
12. Уилбер К. Око духа: Интегральное видение для слегка свихнувшегося мира: пер с англ. В. Самойлова / под ред. А. Киселева. – М.: ООО «Издательство АСТ» и др., 2002. – 476. [4] с. – (Тексты трансперсональной психологии).
13. Бодрийяр Ж. Симулякры и симуляция: пер. О.А. Печенкина. – Тула, 2013. – 204 с.
14. Collier G.L. We Pretend to Teach, They Pretend to Learn – WSJ, 2013. – <https://www.wsj.com/articles/we-pretend-to-teach-they-pretend-to-learn-1388103868> (дата обращения: 22.05.2021).
15. Норбеков М. Тренировка тела и духа. – СПб.: Питер, 2004. – 160 с.: ил. – (Серия «Исцели себя сам»).
16. Гендель М. Космоконцепция розенкрейцеров или мистическое христианство. – М.: Литан. 2004. – 560 с.
17. Уилбер К. Никаких границ. Восточные и западные стратегии саморазвития человека / пер. с англ. В. Данченко. Wilber K. No Boundary. Eastern and Western Approaches to Personal Growth Boulder-London: Shambala, 1981 K.: PSYLIB, 2004.

18. Уилбер К. Очи познания: плоть, разум, созерцание: пер. с англ. Е. Пустошкина. – М.: РИПОЛ классик, 2016. – 464 с. – (интегральный мир).
19. Бхагаван Шри. Сатья Сай Баба. Истина в афоризмах. Сост. Е. Богатых. – 4-е изд. – М.: Амрита, 2012. – 112 с.
20. Непомнящий А.В. Введение в интегральную антропологию. Ч. 1: Методология знания и методологические основания человековедения: учебное пособие. – Ростов-на Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. – 312 с.
21. Шри Ауробиндо. Час Бога. Йога и её цели. Мать. Мысли и озарения: пер. с англ. В.Г. Баранова, А.А. Шевченко, А.А. Чеха. – Л.: Институт эволюционных исследований «Савитри», 1991. – 94 с.
22. Выступление В.В. Жириновского Фрагмент №7 стенограммы заседания Государственной Думы 17 октября 2012 г. – URL: <http://oleg-smolin.livejournal.com/60655.html> 26.06.2024.
23. Выступление директора НИЦ «Курчатовский институт» Михаила Валентиновича Ковальчука на заседании СФ России 30 сентября 2015 г. – <http://council.gov.ru/events/news/59290/> 18.04.2024 г.
24. Кришнамурти Дж. Первая и последняя свобода. – Нижний Новгород: ДЕКОМ, 2010. – 256 с. – (Серия «Эра Водолея»).
25. Шпитцер Манфред. Антимозг: цифровые технологии и мозг: пер. с немецкого А.Г. Гришина. – М.: ACT, 2014. – 288 с.
26. Тютчев Ф.И. Волшебная струна: Стихотворения. – М.: Летопись, 19967 – 464 с., портр. – (Мир поэзии).

Факторы результативности высшего образования и управление ими в подготовке ИТ-специалистов

Лызь Наталья Александровна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
nlyz@sfedu.ru

Лызь Александр Евгеньевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
aelyz@sfedu.ru

Аннотация. Качественная подготовка ИТ-специалистов предполагает управление ключевыми факторами результативности образования. Проведенный анализ таких факторов показал, что формирование благоприятного образовательного опыта, профессиональных и универсальных компетенций выпускников непосредственно зависит от деятельности студентов и их вовлеченности в учебный процесс. Такая деятельность определяется педагогическими практиками и готовностью студентов к обучению. В статье раскрыты характеристики эффективных педагогических практик, способствующих как вовлеченности обучающегося в продуктивную деятельность, так и развитию мотивации, саморегуляции и когнитивных ресурсов, повышающих готовность студентов к обучению.

Abstract. High-quality training of IT specialists involves managing key factors of educational effectiveness. The analysis of such factors showed that the formation of a favorable educational experience, professional and universal competencies of graduates directly depend on the activities of students and their engagement in the educational process. Such activities is determined by teaching practices and students' readiness to learn. The article reveals the characteristics of effective teaching practices that promote both student involvement in productive activities and the development of motivation, self-regulation and cognitive resources that increase students' readiness to learn.

Ключевые слова: высшее образование, профессиональные и универсальные компетенции, эффективные педагогические практики, готовность студентов к обучению.

Keywords: higher education, professional and universal competencies, effective teaching practices, student readiness to learn.

I. ВВЕДЕНИЕ

Качественная подготовка специалистов в сфере информационных технологий (ИТ) играет ключевую роль в развитии современного технологического общества и поддержании конкурентоспособности компаний на глобальном рынке. Эффективное образование и развитие кадров способствует инновациям и технологическому прогрессу, что, в свою очередь, стимулирует экономический рост. Результативно решать сложные задачи в сфере информационных технологий позволяет глубина знаний и обширность умений подготовленных в вузе ИТ-специалистов. Однако достижение высоких образова-

тельных результатов выпускников зависит от большого количества факторов, которые не всегда осознаются и подвергаются управлению. Цель настоящей статьи – определить главные точки приложения усилий в рамках высшего образования для получения высокого качества образовательных результатов при подготовке ИТ-специалистов. Достижение цели предполагает анализ видов и содержания желаемых образовательных результатов, обзор факторов, влияющих на достижение таких результатов, построение модели с выделением и описанием ключевых детерминант образовательных результатов, а также определение необходимых способов обеспечения качества подготовки ИТ-специалистов.

II. ПЛАНИРУЕМЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Традиционно в качестве результатов обучения в вузе рассматриваются профессиональные знания и умения, а индикатором результативности считается академическая успеваемость. В современных работах акцент в целях и результатах высшего образования делается на образовательной успешности студента и сформированности необходимых компетенций. Как правило, выделяют универсальные и профессиональные компетенции.

Профессиональные компетенции отражают способность выпускника решать конкретные профессиональные задачи и выполнять определенные виды деятельности, зафиксированные в профессиональных стандартах и/или востребованные на рынке труда. Они включают в себя знания, умения и навыки, специфичные для конкретной профессии или области деятельности, и зависят от направления подготовки и направленности образовательной программы.

К универсальным относятся компетенции, которые необходимы каждому человеку для успеха на рынке труда и в профессиональной деятельности, а также для социальной включенности и личностного развития. Универсальные компетенции применяются и развиваются в разных контекстах и видах деятельности, способствуя профессиональной успешности, самореализации, а также полноценной и успешной жизни человека в обществе [1]. Существует множество подходов к выделению и обозначению универсальных компетенций или, как их еще называют, общих навыков. Среди работодателей также распространен термин soft skills – мягкие или гибкие, кроссфункциональные навыки, которые дополняют и

делают действенными профессиональные навыки (hard skills) [1]. Обобщая различные подходы, к универсальным компетенциям в широком смысле отнесем:

- 1) способность к целеполаганию и принятию решений;
- 2) мышление: критическое, аналитическое, системное, творческое;
- 3) самоорганизацию и тайм-менеджмент как управление собственной эффективностью;
- 4) гибкость и адаптивность;
- 5) способность обучаться и саморазвиваться;
- 6) способность к эффективной коммуникации (умение выражать свои мысли, слушать, презентировать результаты);
- 7) способность работать в команде (общительность, дружелюбие, эмоциональный интеллект);
- 8) активная жизненная позиция, целеустремленность, инициативность;
- 9) ответственность в работе;
- 10) стрессоустойчивость;
- 11) лидерство, способность влиять на других, управлять работой команды;
- 12) честность, этичность, вежливость, деловой этикет.

Помимо компетенций важным результатом является образовательная успешность студентов. Современное понимание успешности обучения является многомерным, включающим как академические показатели (посещаемость, успеваемость), так и опыт обучающихся. В понимании успешности существует тенденция, когда к когнитивным и поведенческим результатам добавляются личностные и социальные, связанные с благополучием и личностным ростом. Это свидетельствует о рассмотрении студента как субъекта собственной жизни и самоценности. Под успешностью с позиции субъекта понимается студенческий опыт вовлеченности и самостоятельности в учебно-профессиональной деятельности, реализации в обучении базовых потребностей, а также позитивное оценочное отношение студента к условиям обучения и себе как субъекту деятельности и развития [2]. Дополняя компетенции профессионала как результаты высшего образования студенческим опытом успешности, мы утверждаем ценность самого процесса и обучающегося человека, которые не только влияют на итоговые результаты, но и сами по себе рассматриваются как значимый целевой ориентир.

Таким образом, к индикаторам результативности и целевым ориентирам вузовского обучения можно отнести:

- 1) универсальные компетенции (мягкие навыки);
- 2) профессиональные компетенции;
- 3) образовательный опыт как основу успешности студентов.

Учитывая, что образование и профессиональное развитие не заканчиваются с окончанием вуза, эти результаты должны способствовать не только трудоустройству, но и обучению на протяжении жизни, успешной карьере, профессиональной и личностной самореализации выпускника.

III. ФАКТОРЫ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ

Образовательные результаты студентов зависят от множества факторов. Многочисленные психолого-педагогические и социологические исследования выявляют большое количество социально-демографических, личностно-психологических, педагогических переменных, прямо или косвенно связанных с результативностью образования. Остановимся на факторах, имеющих отношение к образовательному процессу и учебной деятельности студентов.

A. Обзор факторов результативности высшего образования

В формировании профессиональных компетенций существенное значение придается четырем группам факторов [3, 4]: качеству учебных программ и практической подготовки студентов, квалификации преподавателей, материально-технической базе. Программы, которые актуализируются и адаптируются к современным требованиям рынка труда, способствуют лучшему усвоению профессиональных компетенций. Наличие стажировок, практик и лабораторных занятий способствует закреплению теоретических знаний на практике. Преподаватели с актуальными профессиональными знаниями и опытом могут более эффективно формировать необходимые компетенции. Современное оборудование и доступ к профессиональным ресурсам также играют важную роль в формировании компетенций.

Общие (универсальные) компетенции или гибкие навыки (soft skills) опираются на личностные структуры, поэтому их развитие зависит от значительного количества факторов и условий. Так, исследователи особо выделяют интерактивные методы обучения (использование групповых проектов, ролевых игр и дискуссий), обучение в многонациональной и мультикультурной среде (для развития навыков межкультурной коммуникации и толерантности), внеучебную деятельность, участие в студенческих организациях, клубах и волонтерских проектах (для развития лидерских качеств и командной работы), важную роль обратной связи от преподавателей и однокурсников, которая помогает студентам понимать свои сильные и слабые стороны [5, 6]. Также указывается, что базовые знания и умения, которые необходимы для успешного функционирования в современном обществе, такие как ИКТ-компетентность, языковая грамотность и пр. успешно формируются, если в учебный процесс включаются соответствующие курсы, обеспечиваются участие студентов в разнообразных проектах, наличие библиотек, онлайн-ресурсов и доступ к научной литературе. Некогнитивные факторы, такие как эмоциональный интеллект и стрессоустойчивость, играют значительную роль в академической успешности и профессиональном развитии студентов. Эти навыки помогают студентам справляться со стрессом и эффективно взаимодействовать с окружающими, что является важным аспектом их профессионального роста [5].

Развитие гибких навыков, таких как работа в команде, критическое мышление и коммуникативные навыки, зависит как от академического опыта, так и от социальных взаимодействий. Например, студенты старших курсов обычно демонстрируют более высокие показатели по этим навыкам, что связано с их большим академическим опытом [6]. На развитие гибких навыков влияют академическая мотивация и дизайн курсов. Студенты, которые имеют внутреннюю мотивацию и находят личную ценность в своих учебных занятиях, с большей вероятностью глубоко погружаются в материал, развивая такие навыки, как критическое мышление, решение проблем и командная работа. Хорошо спроектированные курсы, включающие четкие цели, организованные мероприятия и адекватное использование технологий, дополнительно способствуют развитию этих компетенций [7]. Важную роль играют учебная среда и методы, используемые преподавателями. Интерактивные и ориентированные на студента методы преподавания, такие как проектное обучение и совместная деятельность, способствуют развитию общих компетенций. Эти методы поощряют активное участие и практическое применение знаний, что является важным для развития таких навыков, как коммуникация, лидерство и адаптивность [4]. Кроме того, при эффективном использовании цифровые инструменты и платформы могут поддерживать развитие общих компетенций, предоставляя студентам возможности для решения разнообразных и сложных учебных задач, которые отражают реальные вызовы.

Важнейшим фактором развития и профессиональных, и универсальных компетенций студентов является качество преподавания, профессиональная подготовка преподавателей и постоянное обновление своих знаний и умений [4–6]. Хорошо подготовленные преподаватели могут значительно улучшить учебные результаты своих студентов, способствуя развитию их компетенций. Таким образом, образовательные результаты студентов формируются под влиянием множества факторов, дополняющих друг друга и обеспечивающих комплексную подготовку студентов к профессиональной деятельности и жизни в сложной среде. Также необходимо отметить, что эти факторы включают как внешние (институциональные и педагогические), связанные с вузовской средой, форматами, технологиями, методами обучения и способами взаимодействия преподавателей со студентами, так и внутренние (личностные), связанные с мотивацией, знаниями, навыками, личностными качествами обучающихся. Часть из них оказывает прямое влияние на результаты, часть действует опосредованно.

B. Модель факторов результативности образования

На основании проведенного анализа построена модель факторов результативности высшего образования, в которой выделены три уровня воздействия и соответствующие им контекстуальные, предшествующие и непосредственные факторы (см. рис.).

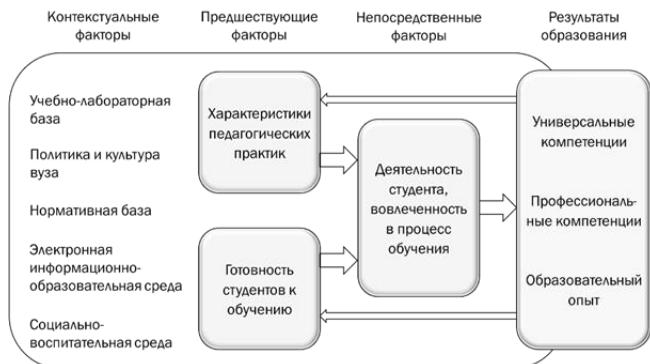


Рис. Модель факторов результативности высшего образования

Контекстуальные – это институциональные факторы, связанные с культурным, материальным, образовательным наполнением пространства вуза. К ним относятся [1]:

- 1) учебно-лабораторная база, обеспечивающая реализацию различных образовательных технологий;
- 2) политика и культура вуза, определяющие организационные и социально-психологические условия его функционирования;
- 3) нормативная база, включая образовательные программы, которые задают содержание, форматы, траектории, направленность и результаты обучения;
- 4) электронная информационно-образовательная среда, способствующая организации обучения и доступу к разнообразным учебным ресурсам и вузовским сервисам;
- 5) социально-воспитательная среда, определяющая пространство возможностей для личностного развития и самореализации студентов.

Контекстуальные факторы влияют на следующий уровень факторов, названных нами предшествующими. Их можно разделить на две группы, связанные с субъектами образования: преподавателями и студентами. Первая группа включает характеристики педагогических практик: используемые образовательные технологии, учебно-методическое обеспечение, методы обучения, способы взаимодействия и организации деятельности обучающихся. Вторая группа факторов отражает готовность студентов к обучению – их базовые знания, умения, интересы, мотивацию, способности к саморегуляции и пр.

Непосредственные факторы связаны с самим процессом овладения опытом – деятельностью студента, в том числе используемыми им учебными стратегиями и вовлеченностью в процесс обучения. Вовлеченность предполагает заинтересованность, активность, настойчивость студента, инвестицию своих временных, когнитивных, волевых усилий в процесс обучения. Именно вовлеченность опосредует влияние предшествующих факторов и непосредственно воздействует на результаты образования [8].

C. Педагогические практики как ключевой фактор результативности обучения

Из всех указанных выше факторов наибольший эффект для результативности образования дают качественные педагогические практики и современные образовательные технологии, используемые преподавателями, а также достаточная готовность студентов к обучению.

В науке доказано, что студентоцентрированные модели обучения в университете, ориентированные на высокую активность и автономию студентов, способствуют результативности обучения и успешности выпускников [9]. К общим принципам, реализуемым в таком обучении, можно отнести [1]: уважение и принятие студента как личности; вовлечение студентов в профессиональную, социально и личностно-значимую деятельность; актуализация самоопределения и рефлексии имеющегося опыта; обеспечение разнообразия среды, позволяющей удовлетворять потребности и интересы студентов, апробировать и утверждать их собственные позиции, ценности, смыслы; наставничество, сотрудничество преподавателей и студентов в решении общих задач; опора на сильные стороны студентов, их потребности, интересы.

В зарубежной педагогике распространение получили семь принципов эффективной практики обучения в вузе, обеспечивающей результативность обучения [10]:

- 1) практика обучения должна поощрять контакты между студентами и преподавателями, помогать студентам преодолевать трудности;
- 2) практика обучения должна поддерживать сотрудничество между студентами;
- 3) необходимо поощрять активное обучение, когда студенты соотносят то, что они узнают, с прошлым опытом и применяют это в своей жизни, делая то, что изучают, частью своего опыта;
- 4) обучение должно обеспечивать оперативную обратную связь о продвижении студентов, оценке имеющихся знаний и компетенций, а также давать рекомендации по их улучшению;
- 5) практика обучения должна уделять особое внимание времени на выполнение задачи; помогать студентам в эффективном обучении и тайм-менеджменте;
- 6) в обучении важно иметь позитивные ожидания относительно студенческих успехов;
- 7) практика обучения должна уважать различные таланты и способы обучения.

Реализация описанных педагогических принципов для успешного обучения в первую очередь осуществляется преподавателями. Однако, возвращаясь к многоуровневой модели факторов результативности обучения (см. рис.), следует отметить, что эта реализация зависит и от всего вуза: политики, культуры, адекватных ресурсов, в том числе финансирования процессов развития и повышения квалификации педагогов. Администраторам, преподавателям, учебно-вспомогательному персоналу необходимо понимать и разделять общие цели и принципы, выстраивать процессы развития, соответствующие целям, постоянно изучая, насколько хорошо они достигаются.

Качество преподавания является важнейшим фактором успешности обучения, но оно оказывает влияние, когда студенты используют возможности, предоставляемые вузом, и инвестируют свое время, энергию и другие ресурсы в процесс обучения. А это, в свою очередь, зависит от готовности студентов к обучению.

D. Готовность студентов к обучению

Ориентация на развитие компетенций, интегрирующих знания, умения, способности обучающихся, предполагает наличие у абитуриентов как базовых предметных знаний, так и определенных качеств. Для успешного обучения в вузе необходимы готовность и способность студентов не только к освоению профессиональных знаний и умений, но и к выбору образовательной траектории, к самоорганизации обучения, к преодолению трудностей и противоречий учебно-профессиональной деятельности.

В отечественной науке для описания студента, способного использовать возможности обучения для своего развития, используется понятие субъект учебно-профессиональной деятельности – это человек, который способен управлять ею и брать на себя ответственность за результаты [1]. В зарубежной науке распространено понятие «саморегулируемый студент» (self-regulated student) – метакогнитивно, мотивационно, поведенчески активный в учебном процессе, т.е. управляющий своим обучением, использующий соответствующие стратегии планирования, поддержания организованности и мотивации [11].

Под готовностью студента (абитуриента) к освоению образовательной программы и в целом к успешному обучению в вузе понимается интегративное психологическое образование, обеспечивающее эффективность и развитие всех видов деятельности, входящих в нее (учебно-познавательной, профессионально-практической, исследовательской, проектной, деятельности самообразования и саморазвития) [12]. Готовность студентов к обучению в вузе включает четыре компонента: мотивационный, регулятивный, когнитивный, знаниево-операциональный. Психологическая готовность студента способствует адаптации к образовательной среде вуза и возникающим ситуациям, регуляции состояний в связи с задачами учебно-познавательной деятельности, актуализации его личностного и познавательного потенциала, оптимизация процесса решения учебных задач и достижению необходимых образовательных результатов.

IV. УПРАВЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫМИ ФАКТОРАМИ ПОДГОТОВКИ ИТ-СПЕЦИАЛИСТОВ

На основе описанного выше можно говорить о том, что качественная подготовка ИТ-специалиста, ориентированная на востребованные образовательные результаты, предполагает управление всеми факторами результативности образования (см. рис.), но в рамках данной статьи рассмотрим только ключевые факторы, которые обусловливают деятельность и опыт студентов, непосредственно влияющие на образовательные результаты. К таким факторам отнесем применение эффективных педагогических практик и повышение готовности студентов к обучению.

A. Внедрение эффективных педагогических практик

Учитывая ориентацию на развитие не только профессиональных, но и универсальных компетенций, в подготовке ИТ-специалиста необходимо использовать как профессионально, так и личностно ориентированные педагогические практики, которые бы способствовали эффективному управлению познавательной, проектно-профессиональной, исследовательской деятельностью, а также мотивацией, вовлеченностью, самообразованием и саморазвитием студентов.

На основании ряда исследований [3, 8, 10, 13, 14] можно говорить о том, что переход к эффективным педагогическим практикам предполагает внедрение:

- 1) методов активного обучения, вовлекающих студентов в процесс обучения, стимулирующих их активное участие и повышающих мотивацию (например, дискуссии позволяют студентам выражать свои мысли, учиться аргументировать и критически мыслить; групповые проекты способствуют развитию навыков командной работы и управлению проектами, анализ кейсов помогает студентам применять теоретические знания на практике, решая реальные проблемы);
- 2) интерактивных методов обучения с использованием технологий и средств, которые делают обучение более динамичным и увлекательным (например, использование онлайн-платформ для доступа к материалам, тестам и взаимодействия с преподавателями, моделей смешанного обучения, симуляций и виртуальной реальности для создания реалистичных сценариев обучения);
- 3) персонализированных методов обучения, направленных на учет индивидуальных особенностей и потребностей каждого студента (например, использование разноуровневых заданий или адаптивных обучающих систем, подстраивающихся под уровень знаний и прогресс каждого студента);
- 4) проектного и проблемного обучения, ориентированных на решение практических задач и комплексных проблем, предполагающих работу в командах, применение междисциплинарных знаний и/или исследовательских методов;
- 5) методов коллaborативного и горизонтального обучения, предполагающих включение студентов в совместные процессы обучения, взаимообучения, обмена опытом;
- 6) интегрированного обучения, связанного как с интеграцией знаний из разных областей для решения комплексных задач, так и с интеграцией теории и практики, например, посредством проведения практических занятий, стажировок и проектов на базе предприятий и организаций;
- 7) эффективных методов оценивания и регулярной обратной связи, способствующих постоянному улучшению учебного процесса и результатам студентов (например, формирующего оценивания с целью выявления пробелов и корректировки учебного процесса, анализа работ студентов для оценки прогресса и достижений);
- 8) креативных и инновационных методов, например, творческих подходов к решению задач, игровых элементов для повышения мотивации и вовлеченности;
- 9) психолого-педагогической поддержки, коучинга и/или менторства, помогающих студентам развивать личностные и профессиональные навыки, достигать учебные и карьерные цели через индивидуальные консультации и наставничество.

B. Повышение готовности ИТ-студентов к обучению в вузе

Сопоставление необходимой и реальной готовности ИТ-студентов к обучению в вузе позволяет выделить три ключевые проблемы, связанные с когнитивным развитием, мотивацией и вовлеченностью, саморегуляцией и готовностью к преодолению трудностей [15, 16].

Проблемы когнитивного плана возникают вследствие преобладания у студентов клипового мышления над системным и логическим, что не позволяет эффективно анализировать информацию, выстраивать связи и делать логические выводы. Также к когнитивным проблемам можно отнести трудности с запоминанием и пониманием информации. Решение таких проблем видится в развитии метакогнитивных навыков студентов, а также в использовании методов обучения и учебных задач, вовлекающих студентов в критическое осмысление, анализ и синтез информации.

Проблемы мотивации и вовлеченности студентов возникают в связи с преобладанием престижно-материальных мотивов выбора профессии и, как следствие, внешней мотивации обучения, зачастую наблюдаемой у ИТ-студентов [16]. Для решения этих проблем необходимо педагогическое управление мотивацией, которое рассматривается как организация деятельности обучающихся с учетом реализации их потребностей и нахождения ими новых смыслов обучения и целей личностно-профессионального развития, способствующих усилению внутренних мотивов и вовлеченности в процесс обучения [17].

Проблемы саморегуляции связаны с недостатком ресурсов субъектности студентов, играющих важную роль в самоорганизации обучения. К таким ресурсам относятся умения управлять своей учебной деятельностью, направлять себя на значимые цели вопреки трудностям, сиюминутным импульсам и соблазнам. Как показывают исследования [15], у многих ИТ-студентов умения самостоятельного планирования, контроля и коррекции деятельности недостаточны, а падение мотивации при дистанционировании от коллег и преподавателей при онлайн-обучении не способствует их актуализации и развитию. Для эффективного управления деятельностью и развитием студентов необходимо оптимальное сочетание самоорганизации и внешнего управления [1]. В том случае, когда студент еще не знаком с требованиями учебной дисциплины и не обладает достаточной мотивацией и саморегуляцией, преподаватель должен взять на себя функцию тактического управления его деятельностью (т.е. достаточно жесткой регламентации и перманентного контроля). В дальнейшем предоставление студентам все более широких возможностей для выбора (тематики работы, уровня задачи, способа и ресурсов для выполнения задания, темпа работы и пр.) и развитие их регулятивных ресурсов обеспечивает переход к саморегулируемому обучению, а актуализация мотивации профессионального развития и расширение свободы самопроявления студентов ведет к самоуправляемому обучению для достижения собственных образовательно-профессиональных целей.

Таким образом, важность целостной готовности ИТ-студентов к обучению в вузе и наличие «слабых звеньев» в их когнитивных, мотивационных и регулятивных ресурсах требуют особых способов управления

деятельностью студентов, ориентированных не только на обучение, но и на развитие мышления, мотивации и саморегуляции. В плане повышения готовности студентов к обучению и эффективности учебной деятельности важную роль играют следующие задачи:

1) расширение интересов и кругозора студентов в сфере соответствующей профессиональной деятельности и науки, ее тенденций и перспектив;

2) актуализация источников внутренней мотивации через поддержку самопознания и профессионального самоопределения студентов, помочь в прогнозировании профессионального будущего и нахождении личностного смысла учебы;

3) повышение заинтересованности студентов в освоении опыта посредством вовлечения в практическую деятельность, демонстрации роли осваиваемых знаний в жизни и профессиональной деятельности;

4) предоставление обучающемуся свободы выбора тематики работы, задания или способа его выполнения для того, чтобы он смог учесть свои образовательные потребности и профессиональные интересы;

5) обучение недостаточно развитым умениям, например, критическому анализу информации, сложным учебным действиям, тайм-менеджменту, командному взаимодействию и пр.

6) организация рефлексии результатов обучения и самопознания студентов, что позволяет им адекватно оценивать свои возможности и ограничения, отслеживать свой прогресс, находить новые значимые цели обучения и развития;

7) создание ситуаций успеха и психологическая поддержка для повышения веры студентов в себя и настойчивости в достижении целей.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ факторов результативности образования показал, что формирование благоприятного образовательного опыта, профессиональных и универсальных компетенций выпускников непосредственно зависит от деятельности студентов и их вовлеченности в учебный процесс, которые в свою очередь определяются педагогическими практиками и готовностью студентов к обучению. В связи с наличием дефицитов в такой готовности необходимо использовать эффективные педагогические практики, способствующие не только вовлеченности обучающегося в продуктивную деятельность, но и развитию мотивации, саморегуляции и когнитивных ресурсов, повышающих готовность к обучению. Поэтому наиболее важно использовать методы активного, интерактивного, проектного, проблемного, коллaborативного обучения, вовлекающие студентов в реальную деятельность и взаимодействие с другими людьми, обеспечивающие рефлексию своей деятельности, способствующие нахождению значимых целей собственного развития, формированию ответственности и настойчивости в достижении целей.

Ключевая задача преподавателя – управление деятельностью студентов, предоставление процедур, ресурсов и сопровождения, помогающих обучающимся приобрести знания и умения и освоить компетенции. В педагогическом управлении необходимо опираться на образовательные потребности и интересы студентов, развивать их, способствуя вовлеченности обучающегося и самоорганизации его деятельности. Такое управление носит «мягкий» характер, поскольку активность преподавателя направлена на то, чтобы создавать условия, организовывать и направлять деятельность студента, а также вовлекать, сопровождать и поддерживать его в процессе обучения. Необходимая в плане получения требуемых образовательных результатов гибкость педагогического управления обеспечивается пониманием преподавателем образовательных потребностей, опыта, интересов, способностей студентов и умением создавать условия для их развития. Здесь важны не только предметные, психолого-педагогические, методические знания и навыки преподавателя. Высокая эффективность его деятельности достигается, когда эти знания и навыки интегрируются на основе ценностного отношения к студентам и их профессионально-личностному становлению, заинтересованности и увлеченности своей профессией и своим развитием, стремления реализовать свой потенциал в педагогической деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лызь Н.А., Лызь А.Е. Новая педагогика высшей школы: непрерывное образование, цифровая среда, человек обучающийся. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2024. – 138 с.
2. Лызь А.Е., Лызь Н.А., Нещадим И.О. Успешность обучения в вузе: опыт студентов технических направлений // Современные проблемы науки и образования. – 2022. – № 4. – С. 41. – DOI: 10.17513/spno.31915.
3. Kocak O., Goksu I., Goktas Y. The Factors Affecting Academic Achievement: A Systematic Review of Meta Analyses // International Online Journal of Education and Teaching (IOJET). – 2021. – Vol. 8. No. 1. – P. 454-484.
4. Zuo J., Huang T. Research on the Influencing Factors of Students' General Competency Improvement in Application-Oriented Universities / In: Hu, Z., Dychka, I., He, M. (eds) // Advances in Computer Science for Engineering and Education VI. ICCSEEA 2023. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2023. Vol. 181. – Springer, Cham. – DOI: 10.1007/978-3-031-36118-0_85.
5. Chisholm-Burns M.A., Berg-Poppe P., Spivey C.A. et al. Systematic Review of Noncognitive Factors Influence on Health Professions Students' Academic Performance // Advances in Health Sciences Education. – 2021. – Vol. 26. – P. 1373-1445. – DOI: 10.1007/s10459-021-10042-1.
6. De Prada E., Mareque M., Pino-Juste M. Teamwork Skills in Higher Education: is University Training Contributing to Their Mastery? Psychology: Research and Review. – 2022. – Vol. 35. No. 5. – DOI: 10.1186/s41155-022-00207-1.
7. Li X., Zhu W. The Influence Factors of Students' Transferable Skills Development in Blended-Project-Based Learning Environment: A New 3p Model // Education and Information Technologies. – 2023. – Vol. 28. – P. 16561-16591. – DOI: 10.1007/s10639-023-11892-5.
8. Alp Christ A., Capon-Sieber V., Grob U. et al. Learning Processes and their Mediating Role between Teaching Quality and Student Achievement: A Systematic Review // Studies in Educational Evaluation. – 2022. – Vol. 75. – Art. no 101209. – DOI: 10.1016/j.stueduc.2022.101209.
9. Малошонок Н.Г., Щеглова И.А. Модели организации обучения студентов в университете: основные представления, преимущества и ограничения // Университетское управление: практика и анализ. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 107-120. – DOI: 10.15826/umpa.2020.02.017.

10. Chickering A., Gamson Z. Seven Principles of Good Practice in Undergraduate Education // New Directions for Teaching and Learning. –1991. – Vol. 47. – P. 63-69. – DOI: 10.1002/tl.37219914708.
11. Kauffman H. A Review of Predictive Factors of Student Success in and Satisfaction with Online Learning // Research in Learning Technology. – 2015. – Vol. 23. Available at: <https://journal.alt.ac.uk/index.php/rlt/article/view/1648> (accessed 10.06.2024). – DOI: 10.3402/rlt.v23.26507.
12. Гемелиев Ф.К., Лызь Н.А. Модель психологической готовности студентов к освоению программ профессиональной подготовки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 10 (123). – С. 162-168.
13. Paolini A. Enhancing Teaching Effectiveness and Student Learning Outcomes // The Journal of Effective Teaching. – 2015. – Vol. 15, No. 1. – P. 20-33.
14. Tomaszewski W., Xiang N., Huang Y., Western M., McCourt B., McCarthy I. The Impact of Effective Teaching Practices on Academic Achievement When Mediated by Student Engagement: Evidence from Australian High Schools // Education Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 5. – P. 358. – DOI: 10.3390/educsci12050358.
15. Лызь Н.А., Лызь А.Е. Цифровые технологии в обучении цифрового поколения: проблемы личностно-профессионального развития ИТ-студентов // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 27 сентября – 01 октября 2022 года. – Нижний Архыз: ЮФУ, 2022. – С. 396-403. – DOI: 10.18522/syssyn-2022-77.
16. Лызь Н.А., Лабынцева И.С. Цифровое поколение: трудности студентов и пути их преодоления // Педагогика. – 2022. – Т. 86, № 6. – С. 86-94.
17. Лызь Н.А., Лызь А.Е. Мотивация, вовлеченность и субъективное благополучие студентов: роль преподавателя // Педагогика. – 2024. – Т. 88, № 4. – С. 84-94.

Интеллектуально-творческие способности студентов: особенности и технологии развития

Эксакусто Татьяна Валентиновна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
exakusto@sedu.ru

Кибальченко Ирина Александровна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kibalirina@sedu.ru

Аннотация. Эмпирически обнаружено, что для студентов характерна открытая познавательная позиция, а кристаллизующим фактором их интеллектуально-творческой структуры выступает способность к выявлению изменений и поиску решений. При этом обнаружено, что они характеризуются недостаточно высокими показателями дивергентного мышления, находчивости, свободы ассоциаций. Полученные результаты стали основанием для разработки коррекционно-развивающей программы, включающей тренинговые и рефлексивно-интегративные технологии.

Abstract. It is empirically found that students are characterized by an open cognitive position, and the crystallizing factor of their intellectual and creative structure is the ability to identify changes and search for solutions. At the same time, it was found that they are characterized by insufficiently high indicators of divergent thinking, resourcefulness, freedom of association. The obtained results became the basis for the development of a correctional-developmental program including training and reflexive-integrative technologies.

Ключевые слова: интеллектуально-творческие способности, психотехнологии развития, факторная структура, студенты технической профессиональной направленности.

Key words: intellectual and creative abilities, psychotechnologies of development, factor structure, students of technical professional orientation.

I. ВВЕДЕНИЕ

Интеграция интеллектуального и творческого потенциала является наивысшей ценностью любого общества. Связано это прежде всего с тем, что интеллектуальная деятельность как сбалансированное сочетание интеллектуальных способностей разного типа (ведущими из которых являются понятийные способности), является сквозным «универсальным» процессом, «пронизывающим» все сферы жизнедеятельности человека (И.А. Кибальченко, Я.И. Сиповская, А.В. Трифонова М.А. Холодная и др.). При этом зачастую для решения широкого круга повседневных задач человеку необходимы нетривиальные подходы и принципиально новые идеи, генерировать которые можно только в условиях творческой (в том числе и мыслительной) деятельности (Д.Б. Богоявленская, В.Н. Дружинин, В.Н. Ушаков, В.Д. Шадриков и др.). Особую значимость интеллектуально-творческое развитие личности приобретает в контексте профессиональной деятельности, которая сопровождается активным развитием высоких технологий, насыщенным информационным влиянием, изменчивостью актуальных условий и обстоятельств.

Теоретический анализ показал, что интеллект – это когнитивная структура, которая последовательно интегрирует все ранние формы когнитивных адаптаций (Ж. Пиаже, М.А. Холодная). Интеллект – это уникальный механизм, который позволяет человеку увидеть и познать мир. Он выступает в качестве «верхнего ограничителя потенциальных творческих достижений» (В.Н. Дружинин и др.), сопряжен с проявлением креативности и ее эффектов на крайних полюсах «кreatивного диапазона» [1]. В свою очередь творчество рассматривается как способность создания нового (Д. Векслер, Л. Термен, Р. Стенберг), как активность, которая проявляется в стремлении выйти за пределы заданной проблемы (Д.Б. Богоявленская), в том числе и в профессии.

По результатам анализа современных исследований интеллекта и творчества обнаруживается существенное противоречие: с одной стороны, интеллект и креативность – есть единая человеческая способность (Д. Векслер, Р.Д. Векслер, Р. Стенберг и др.), с другой – интеллект и творчество являются независимыми, отдифференцированными характеристиками при всех значениях IQ (Н. Коган, М. Воллак и др.).

Данное противоречие преодолевается в результатах ряда исследований, где отмечается, что существует связь интеллекта и творчества (Е.П. Торренса) и, что высокий уровень развития интеллекта предполагает высокий уровень творческих способностей и наоборот (М. Айзенк). При этом, к числу основных черт творческой личности относят когнитивную одаренность (Д.Б. Богоявленская). На основании этих и других исследований в психологический тезаурус вводятся интеллектуально-творческие характеристики: гибкость интеллекта, легкость генерирования идей, интеллектуальная продуктивность, открытость познавательной позиции, децентрация (М.А. Холодная); интеллектуальная креативность (Т.Н. Березина) и др.

Особую роль в развитии интеллектуальных и творческих способностей личности играет период обучения в вузе – с одной стороны, это возраст, в котором завершается активное развитие мыслительных операций, формируются различные интеллектуальные навыки, а, с другой, – это основной этап профессионального становления личности. В этот период человек соотносит свои ценности с ценностями приобретаемой профессии и

профессионального сообщества, что задает особую направленность всем интеллектуальным и творческим процессам человека. В этой связи становится актуальным вопрос о специфике взаимосвязей в интеллектуально-творческих структурах студентов (в частности, студентов технической профессиональной направленности инженерных направлений подготовки).

Важно отметить, что интеллектуально-творческие способности необходимо рассматривать в аспекте их взаимосвязи [2–4]. В качестве механизма их взаимосвязи выступает индивидуальный когнитивный ресурс. Нижний и верхний пороги когнитивного ресурса определяются показателем IQ, мотивацией, личностными качествами, творческим выражением авторства, которые должны развиваться в процессе профессиональной подготовки студентов.

Однако в современной научной литературе взаимосвязь интеллектуально-творческих особенностей студентов (и особенно студентов технической профессиональной направленности инженерных направлений подготовки) остается недостаточно изученной. В результате возникают трудности в разработке и использовании психотехнологий развития интеллектуально-творческих способностей. Выявленные проблемы определили цель настоящего исследования: изучение множественных взаимосвязей между интеллектуальными, творческими особенностями студентов технической профессиональной направленности; разработка психотехнологий, направленных на развитие интеллектуально-творческих способностей студентов.

Создание специальных условий развития интеллектуально-творческих способностей студентов целесообразно осуществлять при помощи рефлексивно-интегративных и тренинговых технологий. Остановимся на их обосновании.

Одним из базовых подходов, который способствует развитию интеллектуально-творческих способностей студентов, является рефлексивно-интегративный подход, в котором акцент делается на рефлексии и понятийном мышлении [5]. Сущность этого подхода заключается в том, что он способствует преодолению «разрозненности», противоречивости собственного опыта человека за счет активизации и обращения к понятийному, интроспективному, рефлексивному мышлению, т.е. за счет его вовлечения в мыследеятельностный, чувственно-переживаемый процесс (как правило в ходе обучения). Можно сказать, что речь в данном случае идет об интеграции понятийного мышления, рефлексии, рефлексивной кооперации, рефлексивной системы оценки, которые в ходе активизации (активизации в свою очередь способствует специальным образом организованный учебный процесс) способствуют моделированию и созданию целостного образа происходящего (например, изучаемой темы, объекта, концепта и др.). Направляя понятийное мышление и рефлексивную оценку на свой опыт (включающий разные формы), на содержание образования и на поле понятий как значимый внешний ресурс, субъект будет способен создать образ происходящего [6]. Рефлексивные технологии обеспечивают возможность актуализации научно-обоснованного и прогностичного механизма открытия

себя в опыте, изменения собственного опыта при иерархической интеграции и гармонии «вложенных» форм опыта [7].

Ведущая роль в рефлексивно-интегративном подходе отводится рефлексии как процессу отражающему одновременно и интеграцию, и познание действительности [8]. Именно рефлексия лежит в основе интеллектуально-личностного развития в целом (и интеллектуально-творческих структур в частности) определяя степень корректирующего воздействия на субъекта. В зависимости от сформированности рефлексивных процессов зависит адекватность/неадекватность рефлексивной системы оценки и самооценки. Очевидно, что существует прямая корреляция степени адекватности этой системы от уровня развития рефлексии. Другими словами, развитие рефлексии способствует сформированности рефлексивной готовности и рефлексивной самооценки как контрольно-оценочного ресурсного механизма.

Соответственно, в работе со студентами, важно стремиться к совершенствованию рефлексивной системы оценки, используя для этого специальные методы, в основе которых лежит процесс осмысливания при помощи изучения и сравнения. Эти методы могут применяться как составная часть различных методов обучения (тесты, синквейны, контент-анализ, работа с концептами и т.п.) [9]. Для развития рефлексии возможно использование и специально организованного взаимодействия, которое направлено на актуализацию процесса двойного отражения (по принципу «что я думаю, что обо мне думает партнер»). По сути человек, выступая в роли наблюдателя занимает позицию исследователя по отношению к партнеру по общению и взаимодействию, анализируя его мысли, чувства, поведение и корректируя свои убеждения, паттерны мышления [10]. Такой метод способствует не только адекватной оценке и самооценке, но и умению работать в диалоге с другими людьми, работать в команде. Таким образом, рефлексивно-интегративный подход способствует тому, что активизирует рефлексивную систему, компоненты которой (оценка и самооценка) взаимодействуют друг с другом с целью получения «полезного результата» [11].

Еще одной из технологий, которую можно использовать в работе с интеллектуально-творческими способностями, является тренинг. Несмотря на тот факт, что тренинг понимается в основном как метод, направленный на развитие/формирование умений и навыков, связанных с общением и межличностным взаимодействием, его возможности намного шире и, в том числе, направлены на саморазвитие, самопознание субъекта, гармонизацию профессионального и личностного развития [12]. Особенностью тренинга является его тесная связь с понятием развивающего обучения, получение участниками рефлексивного и эмоционального опыта, что делает его одним из эффективных методов психологического воздействия, который может использоваться в работе как с интеллектуальными, так и творческими способностями.

Основными механизмами, на которые опирается тренинговая работа, выступают [13]:

a) психокоррекционный эффект эмоциональных переживаний, которые обеспечивают поддержку личности (участника тренинга), признание ее интеллектуально-личностных и творческих ресурсов, ценностных ориентаций и мировоззренческих принципов, уникальности и неповторимости «Я»;

b) конфронтационный потенциал, который активизируется в процессе получения обратной связи и провоцирует «столкновение» клиента с самим собой, со своими убеждениями, стереотипами мышления, отношениями. Благодаря этому человек, проживая «внутриличностный конфликт» (под контролем психолога) получает информацию о том, какие «места наименьшего сопротивления» для него характерны и, соответственно, в каком направлении ему необходимо развивать свой ресурс;

c) обучение проявляется в осознании конструктивных элементов своего ресурса, рефлексии и в изменениях (интеллектуально-личностных и творческих), которые приносят удовлетворение клиенту, способствуют его совершенствованию и развитию, позволяя приобретать новый опыт, становиться более успешным в различных сферах жизни.

Таким образом, синтез рефлексивно-интегративных и тренинговых технологий, является основой и коррекционно-развивающего процесса, способствующего актуализации и развитию интеллектуально-творческих структур. Нужно подчеркнуть, что коррекционно-развивающий процесс, направленный на интеллектуально-творческие способности, должен быть ориентирован прежде всего на молодых людей, у которых есть стремление к саморазвитию, совершенствованию своих интеллектуально-личностных особенностей, творческих способностей. В качестве объекта коррекционно-развивающего воздействия могут выступать как отдельная личность, так и группы студентов, что открывает дополнительные возможности для использования этих технологий в процессе учебных занятий (как основных, так и факультативных).

Использование технологий развития интеллектуально-творческих способностей требует проведения предварительной диагностики, что и стало целью эмпирического этапа работы: изучить интеллектуально-творческие способности студентов технической профессиональной направленности инженерных направлений подготовки, выявить их особенности.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мы предположили, что специфика интеллектуально-творческих особенностей студентов обусловлена особенностями интеллектуально-творческих структур и степенью сформированности их характеристик. Теоретико-методологическую основу такого предположения составили положения о важности и необходимости творчества и интеллекта, их непрерывно развивающихся процессов у молодежи [1, 14–18].

Эмпирические методы и методики использованные в исследовании: для выявления студентов с технической профессиональной направленностью использовался «Дифференциально-диагностический опросник» (Е.А. Климов); «Прогрессивные матрицы Равена» – использовались с

целью изучения логичности мышления, измерения общего интеллекта (фактор «g» по Спирмену); «Идеальный компьютер» (М.А. Холодная и др.) – методика использовалась для измерения меры открытости (закрытости) познавательной позиции личности; Тест творческих способностей (Х. Зиверт) – использовался для измерение творческих способностей личности.

Для обработки результатов использовался непараметрический статистический критерий «Угловое преобразование» Фишера, факторный анализ на базе стандартных лицензионных компьютерных программ: «Windows», «Microsoft Office» и «Statistica» (версия 13 – по плавающей лицензии в облачном сервисе ЮФУ).

Выборку составили 75 человек студентов ЮФУ ИКТИБ (10 девушек – 13%, 65 юношей – 87%) инженерных направлений подготовки. В исследовании принимали участие только те студенты, которые продемонстрировали техническую профессиональную направленность по результатам диагностики.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения специфики интеллектуально-творческих особенностей студентов технической профессиональной направленности инженерных направлений подготовки эмпирически были выявлены степень сформированности интеллектуальных и творческих характеристик, их особенности.

При изучении уровня интеллекта, логичности мышления и аналитических способностей получены следующие результаты по сериям: А – 96,73; В – 95,13; С – 77,27; D – 76,93; Е – 48,80. Можно сделать вывод, что с увеличением трудности серии и нарастанием сложности мыслительных операций устойчиво снижаются эмпирические результаты, характеризующие работу интеллекта и аналитические способности студентов. Аналогичные результаты, характеризующие работу интеллекта (снижение показателей) студентов разной профессиональной направленности, представлены и в работах других авторов [19].

Обнаружено, что студенты успешно выполнили задания:

- на установление взаимосвязи в структуре матриц серии А (96,73% – особо высокий уровень);
- на установление аналогии между парами фигур серии В (95,13% – особо высокий уровень).

Особо высокий уровень умственных способностей отражает умение студентов технической профессиональной направленности мыслить согласно способности линейной дифференциации и умозаключениям в соответствие с использованием линейных взаимосвязей. Эти умения значимо (на уровне значимости $p \leq 0,01$) выше (табл. 1) сформированы в сравнение с другими умениями, необходимыми для выполнения серий С, D и Е. Гипотетически такой результат объясняется тем фактом, что студенты технической направленности ориентированы на технические задачи, аналитическую работу с чертежами и графическими фигурами, что обусловлено сформированностью абстрактного мышления.

Проанализируем снижение результатов при выполнении заданий следующих серий. В серии С задания на нахождение прогрессивных изменений в фигурах матриц выполнены на уровне выше среднего (77,27%). Аналогичная картина наблюдается при выполнении заданий серии D на перегруппировку фигур в матрицах (76,93%). В соответствие с полученными результатами логично говорить об уровне выше среднего способности к быстрой наблюдательности и выявлению непрерывных (закономерных) изменений. У студентов технической направленности обнаруживается динамическая внимательность уровня выше среднего, а также способность быстро улавливать количественные и качественные закономерности, способность представлять и, вероятно, строить ментальные репрезентации. Между этими способностями значимые различия не обнаружены, однако они значимо (на уровне значимости $p \leq 0,01$) выше (табл. 1) в сравнение со способностями, необходимыми для выполнения серии Е.

Относительно низкие результаты обнаружены при выполнении заданий серии Е (48,80% – средний уровень). То есть студенты обнаруживают проблемы при разложении фигур основного изображения на элементы, а также недостатки способности наблюдать сложные различия рядов. Такой результат свидетельствует о необходимости развития абстрактного мышления, понятийного и динамического синтеза. Значимые различия в результатах по сериям представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ЗНАЧИМЫЕ РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ РЕЗУЛЬТАТАМИ СЕРИЙ А, В, С, Д, Е ПО КРИТЕРИЮ «УГЛОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ» ФИШЕРА (Φ^*)

Серия	A	B	C	D	E
A	-	Нет значимых различий	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.228$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.228$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 8,4$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$
B	Нет значимых различий	-	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.228$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.228$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 8,061$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$
C	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.228$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.228$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	-	Нет значимых различий	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.172$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$
D	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.228$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.228$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	Нет значимых различий	-	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.172$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$
E	$\Phi^*_{\text{мин}} = 8,4$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 8,061$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.172$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	$\Phi^*_{\text{мин}} = 4.172$, $\Phi^*_{\text{кр.}} = 2.31$ при $p \leq 0,01$	-

Таким образом, результаты статистической обработки данных свидетельствуют о необходимости развития абстрактного мышления, понятийного и динамического синтеза.

Одной из ведущих интеллектуальных (метакогнитивных) характеристик является открытая познавательная позиция как особый тип отношения при вариативности и разнообразии способов осмыслиения события, а также адекватной восприимчивости необычных аспектов происходящего. С помощью методики «Идеальный компьютер» (М.А. Холодная и др., 1993 г.) были получены результаты и проанализированы характеристики меры открытости (закрытости) познавательной позиции

студентов технической профессиональной направленности: объективированные (94,44), субъективированные (5,56), категориальные (79,78), фактические (20,22)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что у студентов значимо преобладают объективированные вопросы над субъективированными и категориальными над фактическими. Эти факты позволяют сделать вывод об открытости у них познавательной позиции. Можно сказать, что студенты данной профессиональной направленности интересуются разнообразными аспектами внешнего мира, стараясь максимально широко и обобщенно понять окружающую действительность. Например, их интересует: в чем смысл жизни; что есть мир; одни ли мы во вселенной; какие технологии обеспечат развитие в будущем и др.

Интеллектуальное авторство неотделимо от творческих способностей студентов. Для их диагностики использовалась методика «Определение творческих способностей» Хорста Зиверта (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. ТВОРЧЕСКИЕ СПОСОБНОСТИ СТУДЕНТОВ

Способности	Находчивость	Комбинирование	Дивергентное мышление	Визуальное творчество	Свобода ассоциаций
Результаты	19.33	12.13	20.67	25.27	17.80

Необходимо подчеркнуть, что результаты по четырем показателям (кроме способности комбинировать) находятся на нижней границе нормы. Такой факт указывает на недостаточность развития творческих способностей студентов. Способность комбинировать находится значительно ниже средних значений, что свидетельствует о некоторой ригидности мышления, отсутствии разнообразия идей, трудности в продуцировании новых смыслов, модификации и комбинировании имеющихся стратегий, сложности перехода от одного аспекта мировосприятия к другому. Лучше всего студенты справились с заданиями на «визуальное творчество», что говорит о достаточном уровне развития созидающей деятельности в наглядной сфере, способности использовать образы зрительного ряда и его предметные результаты.

Таким образом, на основании качественного и количественного анализа первичных психодиагностических данных можно заключить, что студенты технической профессиональной направленности инженерных направлений подготовки имеют интеллектуально-творческий профиль, который может быть представлен в виде структуры, обусловленной уровнями сформированности интеллектуальных и творческих характеристик. Такие результаты стали основанием для проведения факторного анализа и определения интеллектуально-творческих структур (табл. 3).

Использован метод главных компонент. В результате вращения варимакс с нормализацией Кайзера получена факторная структура, состоящая из пяти компонентов. Суммарный процент дисперсии – 84,57%.

ТАБЛИЦА 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-ТВОРЧЕСКАЯ ФАКТОРНАЯ СТРУКТУРА СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Показатели	Факторы				
	1	2	3	4	5
Серия А	0,64	0,09	-0,16	0,66	-0,00
Серия В	-0,48	0,44	0,27	0,23	-0,14
Серия С	0,22	-0,51	0,18	0,28	0,63
Серия D	0,82	-0,22	0,07	0,41	-0,07
Серия Е	0,89	0,14	-0,03	-0,04	0,18
IQ	0,79	-0,07	0,14	0,39	0,28
Уровень познавательной позиции	0,47	-0,05	0,44	0,10	0,50
Объективированные вопросы	-0,01	-0,02	-0,95	-0,17	0,05
Субъективированные вопросы	0,01	0,02	0,95	0,17	-0,05
Категориальные вопросы	-0,14	-0,15	-0,24	-0,90	-0,11
Фактические вопросы	0,14	0,15	0,24	0,90	0,11
Находчивость	0,11	0,89	0,01	0,17	-0,14
Комбинирование	0,08	0,18	-0,46	0,06	0,77
Дивергентное мышление	0,57	0,62	0,12	0,15	-0,19
Визуальное творчество	0,01	0,79	-0,25	0,28	0,09
Свобода ассоциаций	-0,29	0,84	0,22	-0,21	0,25
Дисперсии	21,73	19,5 8	17,4 0	16,2 5	9,61

* Примечание: жирным шрифтом выделены переменные с наибольшим весом.

Факторная структура является неполной: показатель способности устанавливать аналогии между парами фигур («Серия В») не вошел ни в один компонент. В структуре обнаружены прямые и обратные связи, однако преобладает прямой характер связей.

Фактор 1 – кристаллизующий, сонаправленный, включает прямую взаимосвязь трех характеристик: перегруппировка фигур в матрице (Серия D), разложение фигур основного изображения на элементы (Серия Е), общий показатель интеллекта (фактор «g» по Спирмену (IQ)). Содержание этого фактора отражает наличие и значимость для студентов способностей выявлять количественные и качественные изменения согласно используемым закономерностям; возможность работать со сложными количественными и качественными различиями кинетических и динамических рядов; способность к целенаправленному поиску необходимого решения.

Фактор 2 включает взаимосвязь четырех сонаправленных показателей: находчивость, дивергентное мышление, визуальное творчество, свобода ассоциаций. Эти показатели отражают наличие у студентов способностей к свободному вербальному и визуальному творчеству.

Фактор 3 является теоретически обусловленным, так как включает обратную связь показателей доминирующих по количеству объективированных вопросов и субъективированных. Такой факт характеризует способность студентов к концентрации своего познавательного интереса на элементах знания об объективной действительности в противовес сосредоточенности на личностно-значимых событиях и ситуациях.

В факторе 4 теоретически обусловленная обратная взаимосвязь категориальных и фактических вопросов дополнена способностью устанавливать взаимосвязи в структуре матриц (Серия А).

Фактор 5 включает три сонаправленных показателя: прогрессивные изменения в фигурах матриц (Серия С), уровень познавательной позиции (открытая) и способность комбинировать. Его содержание характеризует

способности наблюдательности и отслеживания изменений, быстрого переключения внимания, развитого воображения, представления и комбинирования (в вербальной форме), а также стремление к обогащению ментального опыта.

Обобщая содержание факторов структуры интеллектуально-творческих способностей, можно сделать следующие выводы:

- основным кристаллизующим фактором для студентов технической направленности является способность к выявлению изменений и поиску решений, что обуславливается рядом интеллектуальных способностей: перегруппировка фигур среднего уровня, разложение фигур основного изображения на элементы среднего уровня, уровень интеллекта (Серия Е, IQ = 107);
- в качестве составляющего компонента данной структуры выступило спонтанное вербальное и визуальное творчество;
- дополняется структура теоретически обусловленными факторами открытой познавательной позиции и факторами с интегральным интеллектуальным и творческим содержанием.

Полученные результаты, на наш взгляд, с одной стороны, раскрывают интеллектуально-творческий потенциал студентов инженерных направлений подготовки, а с другой – являются основанием для разработки специальной коррекционно-развивающей программы. Соответственно, была разработана программа с элементами тренинга и рефлексивно-интегративными технологиями «Развитие интеллектуально-творческих способностей студентов». Данная программа предполагает не только совершенствование когнитивных механизмов переработки информации, но и формирование метакогнитивных навыков.

При создании программы учитывались возрастные особенности потенциальных участников, которые характеризуются тем, что все основные интеллектуальные и творческие задатки личности уже обнаружены и развиты в той или иной степени в способности. В этом контексте можно сказать, что открытая познавательная позиция является той «дверью», за которой возможно развитие познавательного интереса в целом, а также отдельных интеллектуальных и творческих ресурсов.

В связи с этим целью программы стало развитие интеллектуально-творческих способностей у студентов посредством актуализации открытой познавательной позиции личности, обогащения интеллектуально-творческих ресурсов, расширения креативного репертуара участников.

Основными задачами программы стали:

- создание условий для коррекционно-развивающей работы студентов в тренинговой форме: актуализировать у студентов внутреннюю мотивацию к творческой активности, самопознанию и развитию своих способностей, сформировать готовность к работе в группе, способствовать развитию рефлексии;

- развитие потенциала интеллектуально-творческих способностей студентов: способствовать осознанию своих способностей и ресурсов, мотивировать к их развитию, развитию открытой познавательной позиции и расширению мировоззренческой позиции.

Данная программа составлена в соответствии с основными принципами работы коррекционно-развивающей группы: активности; конфиденциальности; взаимодействия «здесь и сейчас»; персональной ответственности; эффективной обратной связи.

Основными методологическими основаниями программы, учитывающими принцип разностороннего развивающего воздействия на интеллект как интегральную систему психики, включающую логический, лингвистический (вербальный), пространственный, музыкальный, внутри- и межличностный компоненты, являются:

- рефлексивно-интегративный подход, акцентирующий внимание на процессах порождения новых идей, динамике их развития и контроле результатов – позволяет посредством самонаблюдения и рефлексии мышления сделать неявное знание явным, помочь в осознании своих ментальных репрезентаций, образов, схем, а также в осуществлении деятельности по достижению своих планов и перспектив;
- социально-психологический (тренинговый) подход, ориентированный на развитие социально-психологической компетентности, повышение вербальной компетентности, активное обучение и интенсивное групповое взаимодействие;
- эзистенциально-гуманистический подход, концентрирующийся на уникальности личности и ее переживаний – в контексте нашей программы данный подход является основанием осознанного саморазвития своих способностей (в том числе и интеллектуально-творческих ресурсов) и ответственности за данный процесс;
- деятельностный подход, центрированный на развитии различных видов психической деятельности – позволяет не получать знания в готовом виде, а «добывать» их самостоятельно в процессе собственной познавательной деятельности, что дает возможность развить интеллектуально-творческие способности и сформировать навыки конвергентного и дивергентного мышления;
- арт-терапия, направленная на развитие визуального восприятия и визуального творчества.

Ключевыми методами данной тренинговой программы выступают: мини-лекции, работа (в том числе и групповая) над проектами, коллективное/индивидуальное решение кейсов, групповая дискуссия, проективный рисунок, интерактивная игра.

Данная программа была разработана на основе результатов, полученных в ходе диагностики интеллектуально-творческих ресурсов студентов ИКТИБ ЮФУ (в возрасте от 18 до 24 лет) и рассчитана на малые студенческие группы, численностью 10-15 человек. Предполагается, что все участники – это психически здоровые люди, эмоционально стабильные, стремящиеся к саморазвитию и самосовершенствованию. Развитие интеллектуально-творческих способностей с одной стороны обеспечит эффективность процесса обучения, с друго-

й развитию одаренности в структуре интеллектуально-личностного ресурса и успешности студентов в различных сферах жизнедеятельности.

Форма проведения: групповые занятия, включающие в процессе работы в том числе и задания для индивидуальной деятельности. Выбор групповой формы работы обусловлен, с одной стороны, возможностью совместной познавательной деятельности участников группы, а, с другой – дополнительной возможностью развития коммуникативных навыков и формирования положительного самоотношения и самопринятия при создании условий успешного и эффективного социального взаимодействия (возможность сравнить себя с окружающими, получить поддержку и эффективную обратную связь).

Срок реализации программы: 1,5 месяца. Курс практических занятий рассчитан на 5 занятий по 4 академических часа. Рекомендуемая частота занятий – один раз в неделю. Реализация программы осуществляется в три этапа.

Вводный этап – знакомство студентов с ведущим и участниками группы, введение в программу, ознакомление с принципами и правилами работы в группе, создание в группе доверительной атмосферы, актуализация у студентов стремления к самопознанию и развитию интеллектуально-творческих способностей, формирование готовности к работе в группе, входящая диагностика.

Основной этап – развивающие занятия – включает в себя три блока, содержание которых направлено на развитие отдельных компонентов интеллектуально-творческих способностей студентов согласно выбранным направлениям работы:

- развитие интеллектуальных способностей студентов, на основе развития открытой познавательной позиции;
- развитие верbalных и визуальных творческих способностей студентов;
- развитие дивергентного мышления студентов.

Заключительный этап включает подведение итогов, обсуждение достигнутых результатов, повторную диагностику интеллектуально-творческих способностей, а также общее анкетирование для оценки эффективности программы (по Д. Киркпатрику).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно заключить, что существует связь интеллекта и творчества, а высокий уровень развития интеллекта предполагает высокий уровень творческих способностей и наоборот. Основными характеристиками интеллектуально-творческих способностей являются гибкость интеллекта, легкость генерирования идей, интеллектуальная продуктивность, открытость познавательной позиции, децентрация, интеллектуальная креативность.

Одним из условий формирования интеллектуально-творческих взаимосвязей является сензитивность студенческого возраста к развитию в условиях профессионального становления. Для молодых людей (студентов) характерно усвоение научных понятий, сформированность тех ресурсов, которые открывают возможность

успевать в учебной деятельности, творить, разрабатывать новое, оригинальное в соответствие с их профессиональной направленностью. В связи с этим обнаруживается актуальность не только изучения, но и развития интеллектуально-творческих способностей студентов.

В результате изучения интеллектуально-творческих особенностей студентов технической профессиональной направленности инженерной подготовки обнаружено, что для них характерна открытая познавательная позиция, что обуславливает направленность познавательного интереса на разнообразные аспекты внешнего мира, потребность максимально широко и обобщенно понять окружающую действительность. Выявлена пятифакторная структура интеллектуально-творческих способностей студентов, включающая: выявление изменений при поиске решения; спонтанное вербальное и визуальное творчество; концентрацию на объективной действительности; охват окружающей действительности и обогащение ментального опыта. Кристаллизующим фактором выступает способность к выявлению изменений и поиску решений. Однако обнаружено также, что студенты инженерных направлений подготовки характеризуются недостаточно высокими значениями по показателям «дивергентное мышление», «находчивость», «комбинирование», очень низкими значениями по показателям «визуальное творчество» и «свобода ассоциаций».

Полученные результаты отражают актуальность и необходимость развития интеллектуально-творческих способностей студентов – будущих инженеров в рамках специальной коррекционно-развивающей программы. Особенностью данной программы является опора на тренировочные и рефлексивно-интегративные технологии, которые направлены на актуализацию открытой познавательной позиции и расширение интеллектуального и творческого ресурса студентов. Перспективой развития интеллектуально-творческих способностей студентов станет повышение их личностной и профессиональной успешности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холодная М.А. Понятийные, метакогнитивные и интенциональные способности как ресурсный фактор интеллектуального развития. // Ментальные ресурсы личности: теоретические и прикладные исследования: Материалы третьего международного симпозиума (Москва 20-21 октября 2016 года) / отв. ред. М.А. Холодная, Г.В. Ожиганова. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2016. – 383 с.
2. Дружинин В.Н. Психология общих способностей. – СПб.: Питер, 2006. – 368 с.; Дружинина С.В. Интеллект, креативность и личностные свойства как факторы реальных достижений: автореферат дисс. ... канд. психол. наук. – М., 2016. – 26 с.
3. Дружинина С.В. Интеллект, креативность и личностные свойства как факторы реальных достижений: автореферат дисс. ... канд. психол. наук. – М., 2016. – 26 с.
4. Холодная М.А. Интеллект, креативность, обучаемость: ресурсный подход (о развитии идей В.Н. Дружинина) // Психологический журнал. – 2015. – Т. 36, № 5. – С. 5-14.
5. Кибальченко И.А. Интеграция учебного и познавательного опыта обучающихся: структура, динамика, технологии: дис. ... д-ра психол. наук. – Ростов-на-Дону, 2011. – 364 с.
6. Эксакусто Т.В., Кибальченко И.А. Психотехнологии развития интеллектуального и личностного ресурса: учебник. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 193 с.
7. Кибальченко И.А. Понятийные структуры как интегральный показатель эффектов развития будущих инженеров // Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании: материалы XVII Международной научно-практической конференции (Таганрог, 6–7 июня 2022 г.). – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2022. – 302 с. – С. 18-27. – ISBN 978-5-9275-4153-9.
8. Панов В.И. Психодидактика образовательных систем: теория и практика [Текст]. – СПб.: Питер, 2007. – 352 с.
9. Ушева Т.Ф. Формирование и мониторинг рефлексивных умений учащихся [Текст]: методическое пособие. – Красноярск, 2007.
10. Лефевр В.А. Рефлексия [Текст]. – М.: Когито- Центр, 2003. – 496 с.
11. Александров И.О. Структура индивидуального знания: закономерности организации и становления [Текст]: дис. ... д-ра психол. наук: 19.00.00. – М., 2007. – 392 с.
12. Вачков И.В. Основы технологий группового тренинга. Психотехники [Текст]. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: «Ось – 89», 2003. – 224 с.
13. Осипова А.А. Общая психокоррекция [Текст]. – М.: Творческий центр «Сфера», 2000. – 512 с.
14. Богоявленская Д.Б. Психология творческих способностей: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Академии, 2002. – 320 с.
15. Волкова Е.В. Технологии развития ментальных ресурсов. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2015. – 256 с.
16. Холодная М.А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 384 с: ил. – (Серия «Мастера психологии»). – ISBN 5-469-00128-8.
17. Холодная М.А. Психология интеллекта. Парадоксы исследования. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Питер». 2002. – 272 с.
18. Шадриков В.Д. Способности и одаренность человека: монография. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2019. – 274 с. – ISBN 978-5-9270-0392-1. Электронный: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/88119> (дата обращения: 26.10.2022).
19. Борзяк М.В., Кибальченко И.А. Специфика интеллектуально-творческих способностей студентов разной профессиональной направленности как фактор информационной безопасности // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции; Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, Таганрог, 2022. – С. 250-252

Представление методов eXplainable Artificial Intelligence в структуре онтологии для применения в образовательном процессе

Котова Елена Евгеньевна

Кафедра автоматики и процессов управления
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
eekotova@gmail.com

Аннотация. Область объяснимого искусственного интеллекта, eXplainable Artificial Intelligence, динамично развивающаяся в настоящее время, представлена множеством различных источников информации. Разработка информационной системы на основе онтологического подхода позволит представить данную область знаний в четко структурированном виде с целью применения в образовательном процессе.

Abstract. The field of eXplainable Artificial Intelligence, which is dynamically developing at present, is represented by a variety of different information sources. The development of an information system based on an ontological approach will make it possible to present this field of knowledge in a clearly structured form for application in the educational process.

Ключевые слова: объяснимый искусственный интеллект, интерпретируемый искусственный интеллект, структурирование области знаний, онтологический подход.

Keywords: explainable Artificial Intelligence, interpreted Artificial Intelligence, knowledge architecture, ontological approach.

I. ВВЕДЕНИЕ

Искусственный интеллект оказывает влияние практически на все сферы жизни общества и образовательный процесс не является исключением. Многие преподаватели используют инструменты с поддержкой искусственного интеллекта и методов инженерии знаний.

Анализ источников информации показывает, что в свободном доступе нет единой информационной базы для изучения методов, применяемых в области объяснимого искусственного интеллекта, eXplainable Artificial Intelligence (XAI), или интерпретируемого искусственного интеллекта, Interpreted Artificial Intelligence (IAI). Каждый источник содержит специфическую информацию по теме. Самым узконаправленными источниками информации являются публикации на тему применения конкретных методов или примеров для объяснимости моделей. Чтобы сформировать общее представление о сфере объяснимого искусственного интеллекта, необходимо изучить множество различных источников. В силу объективных ограничений времени изучения отдельных

дисциплин в учебном процессе требуется подход к построению информационной системы, позволяющий в структурированном виде представлять изучаемую область знаний. Онтологический подход к представлению большого количества информации позволяет включать в информационную систему множество источников, базовых концепций, понятий, основных определений, связей, отношений, ссылок, аннотаций и другой информации в четко структурированном виде, что значительно сократит время на получение как общего представления об изучаемой области знаний, так и частных уточнений на основе запросов.

II. ВЫБОР АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Для определения наилучшего алгоритма необходимо выбрать правильную задачу машинного обучения. Лучшие алгоритмы машинного обучения, которые рекомендуется знать, следующие (на примере публикации [1]):

- линейная регрессия (Linear Regression);
- логистическая регрессия (Logistic Regression);
- линейный дискриминантный анализ (Linear Discriminant Analysis);
- деревья классификации и регрессии (Classification and Regression Trees);
- наивный Байес (Naive Bayes);
- метод K-ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN);
- изучение векторного квантования (Learning Vector Quantization, LVQ);
- метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM);
- случайный лес (Random Forest);
- алгоритм Boosting;
- АдаБуст (AdaBoost).

Для решения проблемы следует попробовать применить множество различных алгоритмов прежде, чем определить наиболее подходящий.

Ответ на вопрос, какой алгоритм следует использовать, зависит от многих факторов: прежде всего от размера, качества и характера данных; от доступного времени вычислений; срочности задачи; и постановки задачи [1].

Даже опытный специалист по данным не может сказать, какой алгоритм будет работать лучше всего, пока не попробует разные алгоритмы.

Именно из-за того, что традиционные модели машинного обучения часто трудно понять и интерпретировать, возникает необходимость в объяснимом ИИ. Алгоритмы ИИ (их называют «черные ящики») работают как черные ящики, то есть они принимают входные данные и получают выходные данные, не предоставая возможности пояснить их внутреннюю работу или объяснить выводы. Данные, которые они используют, и достоверность результатов нелегко понять – именно это и пытается решить объяснимый ИИ.

Объяснимый ИИ, eXplainable Artificial Intelligence – это набор методов, принципов и процессов, призванных помочь разработчикам и пользователям ИИ лучше понять модели ИИ как с точки зрения алгоритмов, так и генерируемых результатов [2].

III. ОБЪЯСНИМЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ – ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: КЛЮЧЕВЫЕ РАЗЛИЧИЯ

В публикациях отмечаются определения объясимого ИИ, интерпретируемого ИИ и различия этих понятий.

Объяснимый ИИ (eXplainable Artificial Intelligence, XAI) и интерпретируемый ИИ (Interpreted Artificial Intelligence, IAI) – связанные, но разные концепции в области искусственного интеллекта (ИИ). Обе концепции направлены на повышение прозрачности и понимания моделей.

Объяснимость (explainability) – объяснение, процесс подготовки подробного описания того, каким образом был достигнут результат.

Интерпретируемость (interpretability) – способность определять причину и следствие на основе модели машинного обучения.

Несмотря на то, что часто эти понятия используются взаимозаменяющими, они различаются по своей направленности и подходу [3].

- Объяснимый ИИ (XAI) фокусируется на предоставлении пользователям четких объяснений решений и прогнозов, часто с использованием дополнительных методов, не зависящих от модели, для объяснения решений чтобы сделать сложные модели более понятными. Эти методы могут помочь пользователям понять поведение модели, не требуя детального знания внутренних механизмов. Это включает в себя объяснение причин, лежащих в основе результатов модели, включая используемые данные, алгоритмы и роль модели в принятии решений.

- Интерпретируемый ИИ (IAI) направлен на обеспечение полного понимания внутренних механизмов работы системы ИИ, в том числе того, как система обрабатывает данные, принимает решения и генерирует прогнозы. Это включает в себя анализ особенностей и параметров модели, чтобы понять причинно-следственные связи внутри системы.

Объяснимый ИИ может быть использован для описания модели ИИ, ее ожидаемого воздействия, а также для оценки ее точности и справедливости. Как правило, объяснимый ИИ стремится объяснить данные, используемые для обучения модели (включая причину выбора модели), прогнозы, сделанные моделью и роль алгоритмов, используемых в модели [2]. Объяснимый ИИ требует получить ответ на вопрос, почему модель дала определенную рекомендацию или повела себя определенным образом. Объяснимый ИИ делает модели искусственного интеллекта более управляемыми и понятными. Помогает разработчикам определить, работает ли система ИИ так, как задумано, и быстро обнаружить любые ошибки. Это также помогает укрепить доверие и уверенность среди пользователей системы ИИ [2].

Объяснения могут варьироваться от простых до сложных, они зависят от конкретного потребителя [4]. Объяснения могут быть представлены различными способами. Наиболее распространены графические форматы представления [2].

В литературе по экспериментальной психологии понятия интерпретируемости и объяснимости рассматриваются как психологические конструкции и представляют собой отдельные психологические процессы, характеризующиеся различными ментальными репрезентациями. Вопрос о том, является ли результат интерпретируемым или объяснимым, зависит от пользователя [4].

Процесс объяснение результата модели представляет описание того, как получен результат, как были реализованы правила для достижения результата независимо от контекста. Поскольку объяснения могут быть представлены техническим языком, они больше предназначены для технических специалистов, владеющих базовыми знаниями [4].

Процесс интерпретации результата представляет информацию с учетом различий базовых знаний пользователей, предоставляя объяснения решений с определенной степенью детализации – интерпретируемые системы не должны предоставлять больше деталей, чем необходимо [3, 4].

Объяснение должно быть содержательным и предоставлено таким образом, чтобы его могли понять предполагаемые пользователи. Если пользователи владеют различными наборами знаний и навыков, система должна предоставлять ряд объяснений для удовлетворения потребностей этих пользователей.

Объяснение стремится описать процесс, который привел к результату, интерпретация стремится придать смысл представленного результата человеку [4].

В статье [5] приводится мнение N. Shah, профессора биомедицинской информатики и науки о биомедицинских данных Стэнфордского университета. Профессор Н. Шах (Nigam H. Shah) выделяет три основных типа интерпретируемости ИИ (“three main types of AI interpretability”) [по статье 5]:

- инженерную версию объяснимости (“the engineers’ version of explainability”), ориентированную на то, как работает модель;
- причинно-следственную объясимость (“causal explainability”), связанную с объяснением, почему входные данные модели привели к выходным данным;
- и вызывающую доверие объясимость “trust-inducing explainability”, предоставляющую людям информацию, необходимую для того, чтобы доверять модели и уверенно ее развертывать.

Автор поясняет, что возможно пересечение всех трех типов интерпретируемости (в то же время используя и заменяя понятие “interpretability” понятием “explainability”).

Хотя интерпретируемость и объясимость часто используются как взаимозаменяемые понятия, считается, что есть важные причины различать их. Объяснимые модели по умолчанию интерпретируемы, но обратное не всегда верно [3].

В публикациях отмечается, что тема определения интерпретируемости изучалась в различных работах, однако четкого «консенсуса относительно определения интерпретируемости достигнуто не было», как и относительно определения понятия объясимости [6]. XAI быстро находит применение, но понятия объясимого интеллекта все еще находятся в развивающемся состоянии [7].

В большинстве публикаций акцент делается на утверждении, что объяснение в системах ИИ должно быть ясным и точным, чтобы можно было понять процесс получения результата, а интерпретируемость – это способность давать объяснения в понятных человеку терминах.

IV. ПОСТРОЕНИЕ УЧЕБНОЙ ВЕРСИИ ОНТОЛОГИИ

В онтологии представлен структурированный набор понятий и определений, необходимых для базового ознакомления с моделями ИИ, ключевые термины, в том числе «интерпретируемость» и «объясимость», которые помогут начать применять, анализировать и оценивать модели, стандартизировать интерпретируемость и объясняющую работу на практических примерах в учебном процессе.

В базу знаний онтологии включены сведения об архитектуре объясимого ИИ, методах для объясимости искусственного интеллекта, алгоритмах машинного обучения, функциях потери и метриках оценки моделей.

Для получения информации использованы статьи и информационные блоги от авторитетных авторов в этой сфере с применением методов экспертного анализа, лингвистического анализа текстов, выявления базовой терминологии и построения семантических полей областей знаний.

Архитектура объясимого ИИ представлена тремя ключевыми компонентами: 1 – моделями машинного обучения; 2 – алгоритмами объяснения; 3 – интерфейсами.

Модели машинного обучения являются основным компонентом объясимого ИИ и представляет собой базовые алгоритмы и методы, которые используются для прогнозирования и вывода данных. Этот компонент основан на широком спектре методов машинного обучения, таких как контролируемое, неконтролируемое или подкрепленное обучение, и может использоваться в ряде приложений, таких как медицинская визуализация, обработка естественного языка и компьютерное зрение.

Алгоритм объяснения – это компонент объясимого ИИ, который используется для предоставления информации и понимания факторов, которые наиболее значимы и влиятельны в прогнозах модели. Этот компонент может быть основан на различных подходах объясимого ИИ, таких как важность признаков, атрибуция и визуализация, и может предоставить ценную информацию о работе модели машинного обучения.

Интерфейс – компонент объясимого ИИ, который используется для представления человеку идей и информации, сгенерированной алгоритмом объяснения. Этот компонент может быть основан на широком спектре технологий и платформ, таких как веб-приложения, мобильные приложения и средства визуализации, и может предоставлять удобный и интуитивно понятный способ доступа и взаимодействия с идеями и информацией, сгенерированными системой объясимого ИИ.

Архитектура объясимого ИИ рассматривается как комбинация этих трех ключевых компонентов, которые взаимодействуют между собой, чтобы обеспечить прозрачность и интерпретируемость в моделях машинного обучения.

Представление архитектуры объясимого ИИ является базовой основой разработанной онтологии.

Компонентами онтологии являются: классы, включающие коллекции различных объектов (концепций); индивиды, или экземпляры объектов; атрибуты, или свойства, которыми обладают объекты; и отношения, связывающие концепции друг с другом.

Учебная версия прототипа онтологии XAI-ontomaster разработана при помощи редактора онтологий Protégé (protege.stanford.edu).

Первым этапом является создание основной структуры классов и подклассов. Базовым классом является класс «Онтологическая модель базы знаний», который включает в себя четыре подкласса: «Модели искусственного интеллекта», «Методы для объяснения искусственного интеллекта», «Функции потери» и «Метрики оценки модели».

На рис. 1 изображен граф классов и подклассов онтологии.

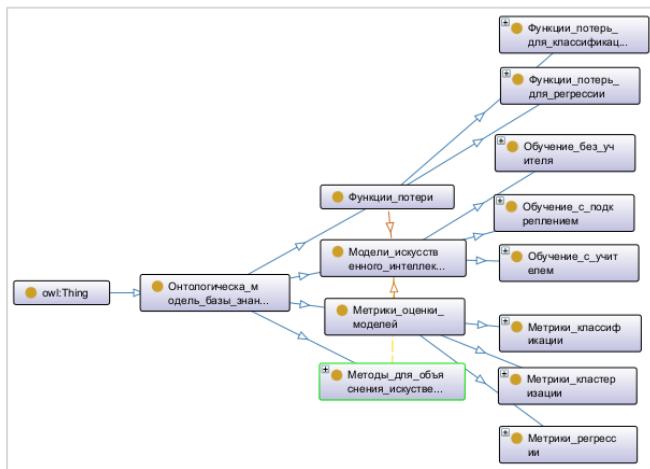


Рис. 1. Структура классов онтологии XAI-ontomaster

Далее на рисунках представлены некоторые примеры подклассов и экземпляров, входящих в онтологию.

Подкласс «Модели искусственного интеллекта» включает подклассы следующего уровня глубины «Обучение без учителя», «Обучение с учителем» и «Обучение с подкреплением».

Подкласс «Функции потери» включает подклассы «Функции потерь для классификации» и «Функции потерь для регрессии».

Подкласс «Метрики для оценки моделей» содержит подклассы «Метрики классификации», «Метрики регрессии» и «Метрики кластеризации».

Вторым этапом в создания онтологии является создание свойств данных. Для каждого свойства данных в аннотации указано расширенное описание свойства.

Для класса «Онтологическая модель базы знаний» созданы свойства «Достоинства» и «Недостатки», поскольку данные свойства применимы ко всем нежелательным подклассам (тип данных string).

Для подкласса «Модели искусственного интеллекта» создано свойство «Категория задач». Оно подразумевает указание типа задач, которые модель в состоянии решить (тип данных string).

Для подкласса «Методы для объяснения искусственного интеллекта» создано три свойства (тип данных string).

1. «Локализация», в котором указана информация о том, для какого уровня объяснения используется метод.

2. «Тип входных данных», в котором указана информация о том, с каким типом данные должна работать модель, чтобы метод мог объяснить ее результаты.

3. «Форма вывода результата», в котором указана информация о том, в каком виде метод выводит объяснение пользователю о результате работы модели.

На рис. 2 приведен список свойств данных, дополненных краткой аннотацией.

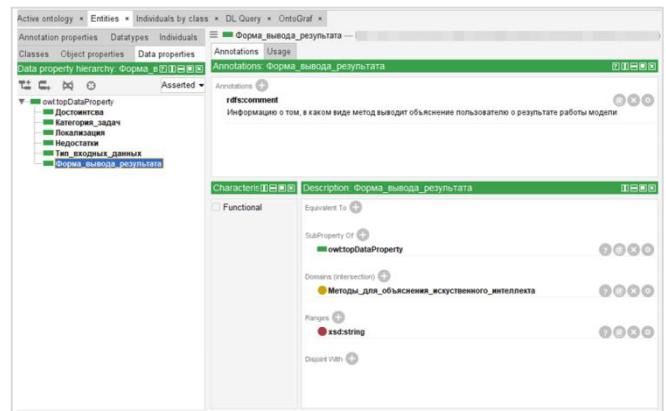


Рис. 2. Список свойств данных с аннотацией

Третьим этапом создания онтологической модели является создание свойств объектов. Для каждого свойства объекта в аннотации указано расширенное описание свойства.

Свойство «Используется для» связывает подкласс «Функции потери» (субъект) с подклассом «Модели искусственного интеллекта» (объект).

Свойство «Используется для оценки результатов работы модели» связывает подкласс «Метрики оценки модели» (субъект) с подклассом «Модели искусственного интеллекта» (объект).

Свойство «Объясняет результат» связывает подкласс «Методы для объяснения искусственного интеллекта» (субъект) с подклассом «Модели искусственного интеллекта» (объект).

На рис. 3 приведен полный список свойств объектов в онтологической модели с аннотацией.

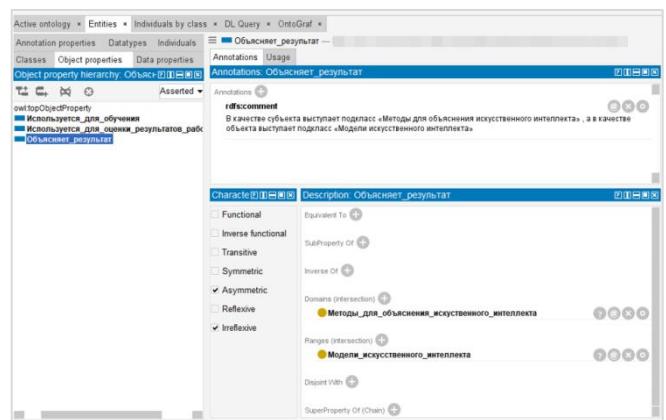


Рис. 3. Список свойств объектов с аннотацией

Четвертым этапом создания онтологии является создание индивидуумов (экземпляров) подклассов.

Подкласс «Методы для объяснения искусственного интеллекта» включает индивидуумы «ELI5», «LIME», «SHAP», «График PDP» и «График ICE». Для каждого индивидуума заданы свойства объекта и свойства данных.

Подкласс «Методы для объяснения искусственного интеллекта» включает экземпляры, изображенные на рис. 4.

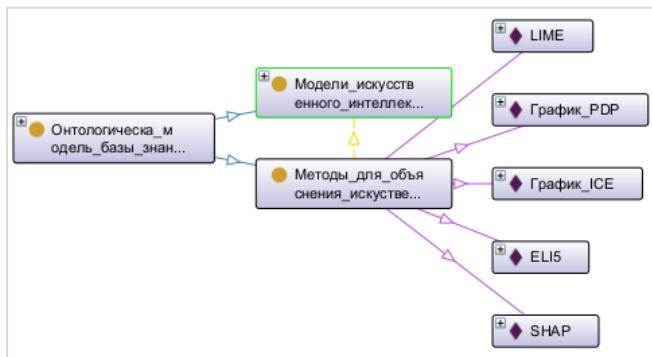


Рис. 4. Структура экземпляров подкласса «Методы для объяснения искусственного интеллекта»

В подкласс «Метрики классификации» класса «Метрики оценки моделей» включены индивидуумы «Accurasy», «F1-Score», «Precision» и «Recall». Для каждого индивидуума заданы свойства объекта и свойства данных. На рис. 5 изображен график, иллюстрирующий созданные экземпляры подкласса «Метрики классификации». В онтологию включены описания каждой метрики. Например, ключевой метрикой для задач классификации является метрика «Precision» («Точность предсказания»). Она определяет число ложноположительных результатов. Метрика особенно важна в медицинской диагностике. Метрика «Precision» может применяться совместно с метрикой «Recall» («Полнота») для определения всех верно идентифицированных случаев, что также важно в системах медицинской диагностики.

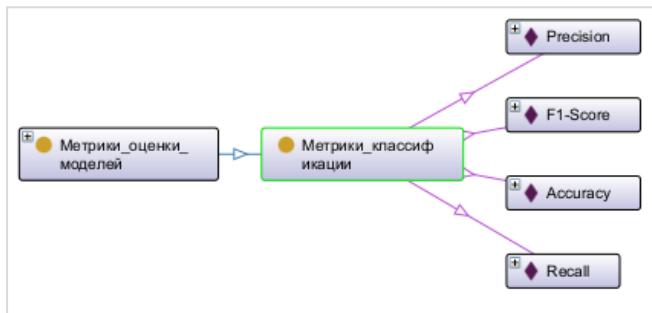


Рис. 5. Структура экземпляров подкласса «Метрики классификации»

В подкласс «Метрики регрессии» класса «Метрики оценки моделей» включены индивидуумы «RMSE», «MAE», «MAPE» и «R2». Для всех индивидуумов заданы свойства объекта и свойства данных. На рис. 6 приведен график, иллюстрирующий созданные экземпляры подкласса «Метрики регрессии».

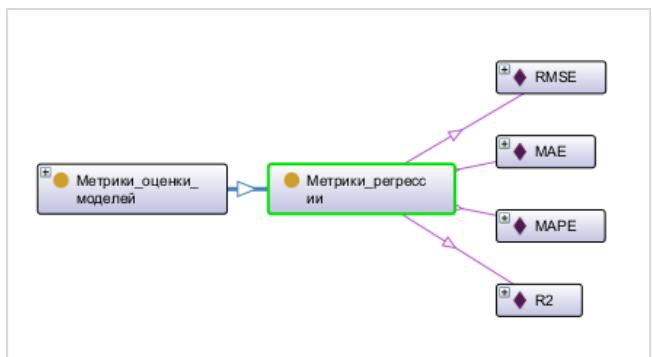


Рис. 6. Структура экземпляров подкласса «Метрики классификации»

В подкласс «Функции потерь для регрессии» класса «Функции потерь» включены индивидуумы «MSE» и «Huber Loss». Для всех индивидуумов заданы свойства объекта и свойства данных. На рис. 7 приведен график, иллюстрирующий созданные экземпляры подкласса «Функции потерь для регрессии».

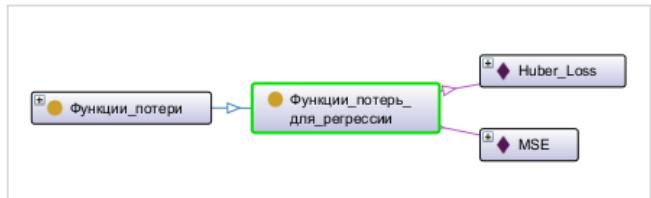


Рис. 7. Структура экземпляров подкласса «Функции потерь для регрессии»

В подкласс «Функции потерь для классификации» класса «Функции потерь» включены индивидуумы «Cross-Entropy» и «Focal Loss». Для всех индивидуумов заданы свойства объекта и свойства данных. На рис. 8 приведен график, иллюстрирующий созданные экземпляры подкласса «Функции потерь для классификации».

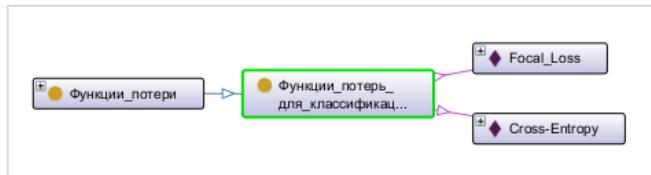


Рис. 8. Структура экземпляров подкласса «Функции потерь для классификации»

В подкласс «Обучение с учителем» класса «Модели искусственного интеллекта» включены индивидуумы с названиями методов «k-ближайших соседей», «Дерево решений», «Случайный лес», «Регрессионный анализ», «Машина опорных векторов» и «Нейронные сети». Для всех индивидуумов заданы свойства объекта и свойства данных. На рис. 9 приведен график, иллюстрирующий созданные экземпляры подкласса «Обучение с учителем».

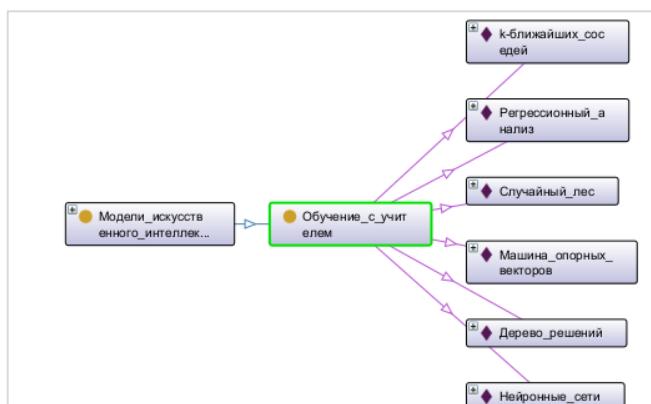


Рис. 9. Структура экземпляров подкласса «Обучение с учителем»

На рис. 10 изображен пример заполненных свойств объекта и свойств данных для экземпляра «SHAP», а также аннотация, включающая в себя информацию из базы знаний.

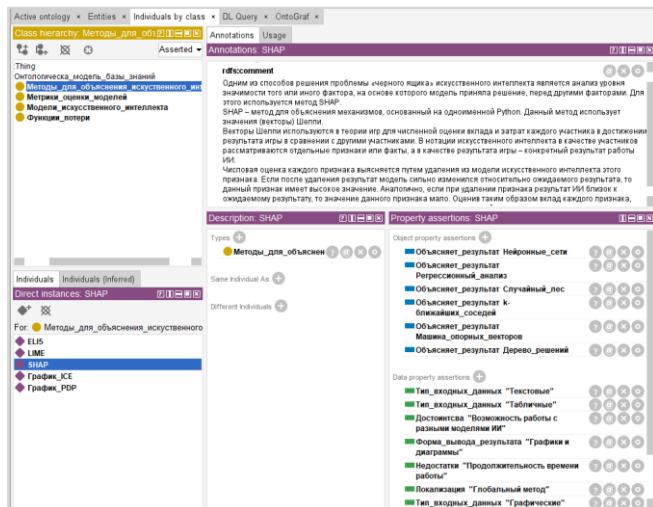


Рис. 10. Пример свойств экземпляра «SHAP» подкласса «Методы для объяснения искусственного интеллекта» с аннотацией

В части интерфейса “Annotations” (рис. 10) отражена информация в виде краткой аннотации (комментария) относительно метода SHAP, который применяется для анализа уровня значимости того или иного фактора, на основе которого модель приняла решение. Аннотация включает необходимую информацию, ссылки на источники и другие описания из базы знаний.

На рис. 11 приведен пример заполненных свойств объекта и свойств данных для экземпляра «Кластеризация k-средних» подкласса «Обучение без учителя», а также аннотация, включающая в себя комментарий из базы знаний.

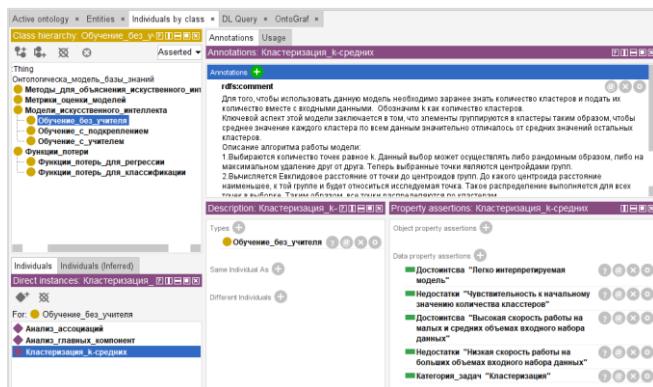


Рис. 11. Пример свойств объекта и свойств данных экземпляра «Кластеризация k-средних» подкласса «Обучение без учителя»

Для создания запросов к онтологической модели используется встроенный инструмент формирования запросов. Запросы позволяют пользователю получать конкретные ответы на интересующие вопросы.

Например, запрос может быть сформулирован следующим образом: «*Необходимо получить информацию о моделях искусственного интеллекта, которые решают задачу регрессии*».

Формулировка запроса с получением ответа изображена на рис. 12.



Рис. 12. Результат запроса поиска моделей ИИ, решающих задачу регрессии

Пример запроса: «*Необходимо найти методы объяснения для частного примера результата работы модели «Случайный лес»*».

На рис. 13 приведена формулировка запроса и полученный результат.

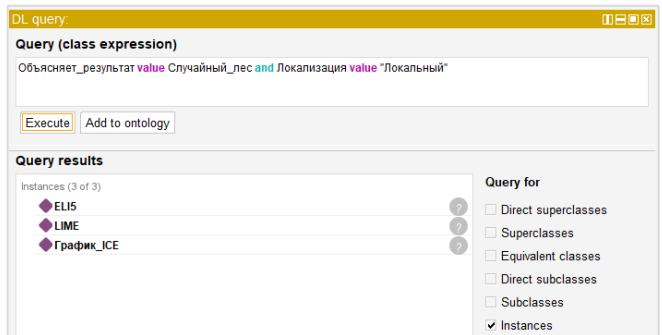


Рис. 13. Результат запроса поиска методов объяснений

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На фоне растущей сложности и повсеместного внедрения систем ИИ задача ознакомления с показателями и способами объяснений результатов может значительно помочь в разработке конкретной системы. Система искусственного интеллекта должна быть способна объяснять свои результаты и предоставлять подтверждающие доказательства принятых решений. По мере того, как алгоритмы машинного обучения становились более сложными, потребность в объяснимости и интерпретируемости приобретала все большую значимость. К настоящему времени данная область активно развивается, существует большое число публикаций на тему методов объяснимого ИИ.

Учебная версия онтологии разработана для образовательных целей и включает систематизированную информацию, которая представлена визуально в удобном виде для понимания сложной и объемной области объяснимого искусственного интеллекта.

Прототип онтологии XAI-ontomaster, созданный в редакторе Protégé, предполагает создание расширенной версии в авторской среде визуализации и анализа информации ОнтоМастер [8], которая на данном этапе находится на стадии доработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Le J.* The Top 10 Machine Learning Algorithms to Know These algorithms can help you learn how to use machine learning. – <https://builtin.com/data-science/tour-top-10-algorithms-machine-learning-newbies> (Accessed July 10, 2024).
2. *Glover E.* Explainable AI, Explained. Explainable AI helps developers and users better understand artificial intelligence models and their decisions. – <https://builtin.com/artificial-intelligence/explainable-ai> (Accessed July 10, 2024).
3. *Gilpin L.H., Bau D., Yuan B.Z., et al.* Explaining explanations: An overview of interpretability of machine learning // In 2018 IEEE 5th International Conference on data science and advanced analytics (DSAA). – 2018. – 9 p.
4. *Broniatowski D.* Psychological Foundations of Explainability and Interpretability in Artificial Intelligence, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. – 2021. – <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8367>.
https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=931426 (Accessed July 10, 2024).
5. *Miller K.* Should AI Models Be Explainable? That depends. – <https://hai.stanford.edu/news/should-ai-models-be-explainabledepends> (Accessed July 10, 2024).
6. *Zhang Y., Tiño P., Leonardis A., Tang K.* A survey on neural network interpretability // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence. – 2021. – 5. No. 5. – P. 726–742.
7. What is explainable AI, or XAI? – <https://www.juniper.net/us/en/research-topics/what-is-explainable-ai-xai.html> (Accessed July 10, 2024).
8. *Котова Е.Е., Писарев А.С., Писарев И.А.* Программный комплекс разработки сценариев анализа данных ОнтоМАСТЕР-Сценарий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613556 от 19.03.2019 г.

Образовательный опыт студентов как субъектов профессионального выбора

Истратова Оксана Николаевна

Институт компьютерных технологий

и информационной безопасности

Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

Московский педагогический

государственный университет

Москва, Россия

oistratova@sfedu.ru

Аннотация. Проблема профессионального самоопределения актуальна в связи с новыми вызовами, с которыми сталкиваются, как молодые люди, так и система высшего образования. Выбор профессии, как результат профессионального самоопределения в юношестве, является одним из новообразований данного возраста. Насколько осознанно, с опорой на внутренние ресурсы сделан этот выбор – во многом определяет дальнейшее профессиональное развитие на стадии профессионального обучения. Понимание студента как активного субъекта образовательного процесса и своих жизненных выборов стало основанием изучения студенческого образовательного опыта в зависимости от степени сформированности позиции субъекта выбора профессии.

В исследовании приняли участие 390 студентов 1–4 курсов ЮФУ, МПГУ, ДГТУ, РГЭУ. С помощью анкеты «Субъективные основания выбора профессии» (И.С. Лабынцева, Н.А. Лызь) были определены две контрастные группы: с сформированной (141 чел.) и отсутствующей (61 чел.) позицией субъекта выбора профессии. Для характеристики образовательного опыта студентов был применен соответствующий опросник ООС (Н.А. Лызь, Е.В. Голубева, О.Н. Истратова). Изучение академической самоэффективности было проведено с помощью одноименного адаптированного опросника (С.В. Гацура, О.А. Гацура). Проверка достоверности полученных результатов была проведена с помощью корреляционного анализа и сравнения контрастных групп с применением U-критерия Манна-Уитни.

Результаты изучения субъективных оснований выбора профессии показали, что только у 36% респондентов сформирована субъектная позиция. Большая часть (48%) демонстрируют промежуточный вариант ее сформированности. И у 16% она не сформирована вообще. У студентов обеих контрастных групп показатели ООС находятся в средних диапазонах: у студентов с выраженной субъектной позицией эти показатели с тенденцией к высокому уровню, а у студентов с невыраженной субъектной позицией – с тенденцией к низкому уровню. При этом студенты-субъекты профессионального выбора статистически достоверно демонстрируют высокий уровень удовлетворенности своей учебой в вузе. Они больше верят в собственные силы и поддержку окружающих. Особенно вера в свои силы проявляется в когнитивном компоненте академической самоэффективности.

Корреляционный анализ показал умеренную положительную связь между выраженностью позиции субъекта выбора профессии и всеми компонентами образовательного опыта и академической самоэффективности студентов. Наибольшие корреляционные связи проявляются с таким субъективным основанием выбора профессии, как «соответствие выбора интересам, целям, жизненным планам». Данный факт обуславливает актуальность психологического сопровождения учащихся школ и студентов в их самопознании, выявлении своих внутренних ресурсов для построения жизненных планов и совершения выборов, в том числе и профессионального.

Abstract. The problem of professional self-determination is relevant in connection with the new challenges faced by both young people and the higher education system. The choice of profession, as a result of professional self-determination in youth, is one of the new formations of a given age. How consciously this choice is made, based on internal resources, largely determines further professional development at the stage of professional training. Understanding the student as an active subject of the educational process and his life choices became the basis for studying student educational experience, depending on the degree of formation of the position of the subject of choosing a profession.

The study involved 390 1st-4th year students of SFU, MPGU, DSTU, and RSUE. Using the questionnaire “Subjective reasons for choosing a profession” (I.S. Labyntseva, N.A. Lyz’), two contrast groups were identified: with a formed (141 people) and absent (61 people) position of the subject of choosing a profession. To characterize the educational experience of students, the corresponding OOS questionnaire was used (N.A. Lyz’, E.V. Golubeva, O.N. Istratova). The study of academic self-efficacy was carried out using an adapted questionnaire of the same name (S.V. Gatsura, O.A. Gatsura). The reliability of the results obtained was checked using correlation analysis and comparison of contrast groups using the Mann-Whitney U test.

The results of studying the subjective reasons for choosing a profession showed that only 36% of respondents had a subjective position. The majority (48%) demonstrate an intermediate version of its formation. And in 16% it is not formed at all. For students of both contrast groups, the OOS indicators are in the average range: for students with a pronounced subjective position, these indicators tend to be high, and for students with an unexpressed subjective position, these indicators tend to be low. At the same time, students who are subjects of professional choice statistically reliably demonstrate a high

level of satisfaction with their studies at the university. They have more faith in their own strengths and the support of others. Self-confidence is especially evident in the cognitive component of academic self-efficacy.

Correlation analysis showed a moderate positive relationship between the expression of the subject's position in choosing a profession and all components of the educational experience and academic self-efficacy of students. The greatest correlations appear with such a subjective basis for choosing a profession as "compliance of the choice with interests, goals, life plans." This fact determines the relevance of psychological support for schoolchildren and students in their self-knowledge, identifying their internal resources for building life plans and making choices, including professional ones.

Ключевые слова: студенты, субъект профессионального выбора, образовательный опыт студентов, удовлетворенность обучением, интенция к расширению опыта, самоэффективность и поддержка, академическая самоэффективность, опыт саморегулируемого обучения, вовлеченность.

Key words: students, subject of professional choice, educational experience of students, satisfaction with learning, intention to expand experience, self-efficacy and support, academic self-efficacy, experience of self-regulated learning, involvement.

I. ВВЕДЕНИЕ

Успешность студентов в их учебно-профессиональной деятельности, а, соответственно, и эффективности современной системы высшего образования, рассматриваются сегодня с возросшей актуальностью. Это обусловлено постоянными вызовами и к системе образования, и к самим студентам, как субъектам этого процесса.

Студенчество – это особенно важный период в жизни любого человека и его становление оказывает влияние на всю последующую жизнь не только с профессиональной точки зрения, но и с социально-психологической. Одна из главных задач студенчества заключается не только в усвоении и применении научных и профессионалах знаний, но и в саморазвитии, планировании и осуществлении самостоятельных выборов в своей жизни. Студенчество занимает весьма важное место в профессиональном становлении человека. Это время обучения профессии, что, соответственно, требует существенных интеллектуальных и физических затрат [1, 2]. В современных социально-экономических условиях многие молодые люди опережают этап начала трудовой деятельности, еще не окончив обучение профессии. Известно, что работающих студентов среди обучающихся на младших курсах вуза становится все больше. И мотивация этой трудовой деятельности чаще внешняя (материальная), чем профессионального самосовершенствования. Причем работа может быть изначально не по тому направлению, по которому студент получает образование [3]. Эти факты говорят о нелинейности процесса профессионального самоопределения в юношеском возрасте и о множестве факторов, его определяющих. Трудность профессионального самоопределения современных молодых людей обусловлена и тем, что вчерашний школьник не обладает полной информацией ни о себе, ни о мире профессий и путей профессионального развития в силу постоянных изменений на рынке труда. Для многих моло-

дых людей проблемой становится принятие самостоятельного решения в условиях гиперопеки родителей. Современные молодые люди не склонны строить дальние перспективы будущего, предпочитая жить сегодняшним днем, откладывая само взросление и принятие ответственности за себя и свои жизненные выборы [4, 5]. Однако поступление в вуз выводит молодого человека на новый уровень своего профессионального развития, которое реализуется на стадии профессионального обучения, на которой студент переосмысливает свой выбор, более самостоятельно и креативно подходит к решению учебно-профессиональных задач.

Современный студент – это не потребитель образовательных услуг, а полноправный субъект образования и профессионального выбора. Центральной возрастной и социальной задачей развития студенчества является формирование целостного и интегрированного представления о самом себе, эмоциональном отношении к себе, самооценке, самоэффективности, умения работать со своими достоинствами и недостатками. Выбор профессии – еще одна важная задача юношества, решаемая выпускником школы. В вузе этот выбор завершен, но не завершен сам процесс профессионального самоопределения и развития, которые рассматриваются через соотнесение субъектом своих внутренних ресурсов с требованиями профессии. Сомнения в выборе знаменуют нормативный кризис, как расхождение между ожиданиями и реальностью в связи с неадекватной мотивацией и образом выбранной профессии на первом курсе и разочаровании в профессии после полученного учебного и практического опыта на старших курсах [6]. Деструктивное протекание этого кризиса может привести к формализации учебной деятельности студента или полному ее прекращению.

Таким образом, важным фактором благополучия / неблагополучия профессионального образования студента являются те субъективные основания, которыми он руководствуется, выбирая профессию и пути ее освоения. Н.А. Лызы и И.С. Лабынцева выделяют следующие основания выбора профессии:

- уверенность в совершенном выборе;
- намерения работать по выбранной специальности после завершения обучения в вузе;
- оценка студентом соответствия выбранной профессии своим способностям, интересам, жизненным целям и планам [7]. При выделении данных оснований авторы исходят из понимания студента как активного субъекта «с активным и ответственным отношением к выбору и, в целом, к определению своего жизненного пути» [7, с. 60].

Соотношение данных субъективных оснований и определяет степень выраженности субъектной позиции студента в его профессиональном выборе. Однако исследования показывают, что чаще всего современные будущие студенты при выборе профессии отталкиваются от ее престижности, перспективности, уровня зарплаты и других внешних критериев выбора, ставя на второй план свою личностную направленность, порой не рефлексируя свои профессиональные и эмо-

циональные ресурсы [8]. Слабость субъектной позиции в профессиональном выборе скорее всего скажется на учебно-профессиональной деятельности студента и в целом – на его образовательном опыте.

Образовательный опыт студентов рассмотрен нами как один из факторов результативности образования, определяющий процессуальную его сторону. Наиболее известными составляющими студенческого образовательного опыта являются удовлетворенность условиями и результатами обучения, саморегулируемое обучение, вовлеченность, учебная активность [9–13]. В нашем исследовании мы также рассматриваем такие компоненты опыта, как интенция к его расширению, самоэффективность, поддержка преподавателей и сокурсников [11]. Образовательный опыт студентов, таким образом, рассматривается сегодня именно с субъектной позиции, где одним из главных компонентов является вовлеченность студента, концентрирующаяся вокруг себя базовые потребности студента в автономии, социальной поддержке, удовлетворенность образованием и др. [14]. Исследования показывают, однако, что вовлеченность в обучение не является сильным ресурсом современных студентов, как с благоприятным, так и неблагоприятным образовательным опытом в целом [14]. Предполагается, что вовлеченность во многом зависит от намерений студентов работать в дальнейшем по выбранной специальности. Данное субъективное основание профессионального выбора, наряду с уверенностью в выборе и оценкой соответствия характеристик выбранной профессии с внутренними ресурсами самого студента и стало объектом настоящего исследования. Существует ли специфика образовательного опыта студентов с разными субъективными основаниями профессионального выбора и разной степенью выраженности субъектной позиции выбора профессии? Ответ на этот вопрос и определил цель исследования.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гипотезой исследования стало предположение о том, что представления студентов о своей успешности в учебно-профессиональной деятельности будут иметь специфику в зависимости от того, как происходил их профессиональный выбор: на каких основаниях и насколько при этом была выражена их субъектная позиция. Участниками эмпирического исследования, проведенного с целью проверки данного предположения, стали студенты бакалавриата и специалитета 1–4 курсов вузов России: ЮФУ, МПГУ, ДГТУ, РГЭУ. Направления и специальности, представлены, как гуманитарными (лингвистика, филология), социальными (психология, педагогика, юриспруденция, экономика), так и техническими (информационные технологии) науками. Общее количество респондентов – 390 человек в возрасте от 17 до 25 лет (средний возраст 19,3), 225 девушек и 165 молодых людей.

С целью диагностики субъективных оснований профессионального выбора была использована анкета [7], три шкалы которой определяют следующие основания профессионального выбора: уверенность в сделанном профессиональном выборе; намерения в отношении будущей работы в избранной профессиональной сфере; оценка соответствия будущей профессии собственным способностям, интересам, ожиданиям, жизненным целям.

Итоговый показатель, как среднее арифметическое показателей трех шкал, отражает степень выраженности позиции субъекта выбора профессии. Для изучения образовательного опыта был применен опросник ООС [11].

Данный опросник включает в себя 5 шкал:

- удовлетворенность образованием;
- интенция к расширению опыта;
- самоэффективность и поддержка;
- опыт саморегулируемого;
- вовлеченность.

Итоговый показатель образовательного опыта отражает степень его благоприятности и результативности обучения и в целом – субъективного благополучия и саморазвития студента [15]. Для изучения субъективного компонента образовательной успешности студентов был применен опросник диагностики академической самоэффективности [16], где академическая самоэффективность рассматривается как один из предикторов успешности обучения студента в вузе [16, с. 38], непосредственно влияя на академическую вовлеченность [17]. То есть собственная уверенность студента в способности к успешным действиям в заданной учебной ситуации непосредственно влияет на удовлетворенность обучением, предотвращая отсев студентов. Результаты опросника представлены по следующим шкалам, отражающим группы компетенций, формируемых в процессе вузовского обучения, структурируемых в блоки:

- когнитивный;
- коммуникативный;
- мотивационный;
- технический.

К полученным результатам были применены методы качественного (сравнение, интерпретация) и количественного (корреляционный анализ – для выявления связи выраженности субъектной позиции студента в его профессиональном выборе с компонентами студенческого образовательного опыта и академической самоэффективности, критерий У Манна-Уитни для оценки различий между двумя выборками по уровню субъективных оснований выбора профессии и компонентам образовательного опыта и академической самоэффективности) анализа.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диагностика субъективных оснований выбора профессии позволила поделить всех участников исследования на три группы по степени выраженности субъектной позиции: наличие субъектной позиции, ее отсутствие и промежуточная группа (рис. 1).

Согласно общему показателю выраженности субъектной позиции, более 3 баллов получили 141 студент, что составляет более трети от всех участников исследования. Шестую часть, 61 человек, составила группа студентов, набравших менее 2 баллов в итоговом показателе, что означает, что они в своем выборе профессии не проявили себя как активные субъекты. Практически

половина респондентов (188 человек, 48 %) составляют промежуточную группу. Необходимо отметить, что анализ данных относительно того, на каких курсах обучаются студенты всех трех групп не дал какой-то специфики: в каждой группе представлены студенты от 1 до 4 курса включительно.

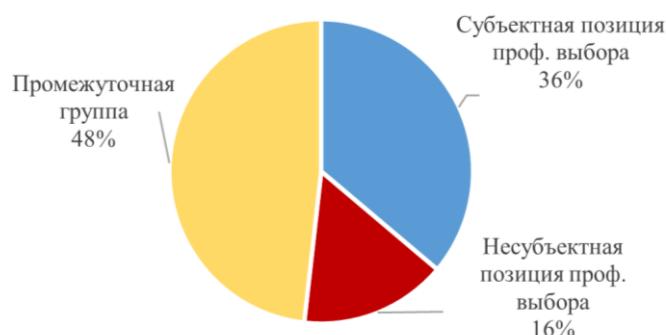


Рис. 1. Распределение выборки в соответствии с выраженной позицией субъекта профессионального выбора (процент от общего числа респондентов)

В дальнейшем анализе результатов был применен метод контрастных групп: сравнивались данные респондентов с выраженной (141 чел.) и невыраженной (61 чел.) позицией субъекта профессионального выбора.

Далее были рассмотрены профили по отдельным субъективным основаниям выбора профессии (уверенность, намерения, оценка соответствия) в группах в выраженной и невыраженной позицией субъекта данного выбора (рис. 2).

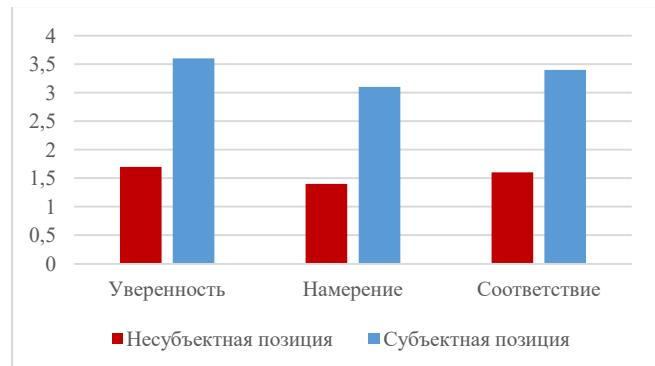


Рис. 2. Субъективные основания выбора профессии у студентов с разной выраженной позицией субъекта

Сравнительный анализ показал, что значения всех оснований выбора у студентов-субъектов профессионального выбора статистически выше: они не сомневаются в верности выбора профессии и направления обучения ($U_{эмп} = 11,08$; $p \leq 0,01$) (шкала «Уверенность»); их намерения работать по специальности после окончания обучения в вузе более твердые ($U_{эмп} = 11,09$; $p \leq 0,01$) (шкала «Намерение»), их оценка степени соответствия характеристик выбранной профессии их интересам, способностям, ожиданиям, целям выше, чем у их сверстников с невыраженной субъектной позицией ($U_{эмп} = 10,98$; $p \leq 0,01$) (шкала «Соответствие»). Каким образом позиция субъекта определяет процессуальные характеристики обучения студентов? Этот вопрос рассмотрен в осо-

бенностях образовательного опыта студентов с разной выраженностью их позиции субъекта профессионального выбора (рис. 3).

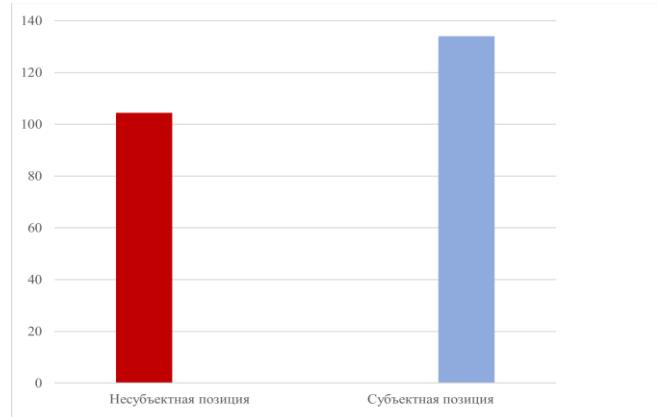


Рис. 3. Общий показатель образовательного опыта студентов с разной выраженной позицией субъекта профессионального выбора

Студенты обеих групп показали средний уровень образовательного опыта по общему показателю. Однако статистический анализ показал, что у студентов с выраженной позицией субъекта профессионального выбора образовательный опыт в целом более благоприятный: их значения имеют тенденцию к высокому уровню, в то время как у студентов с невыраженной субъектной позицией – к низкому ($U_{эмп} = 8,7$, $p \leq 0,01$).

Рассмотрим компоненты образовательного опыта в обеих группах (рис. 4).

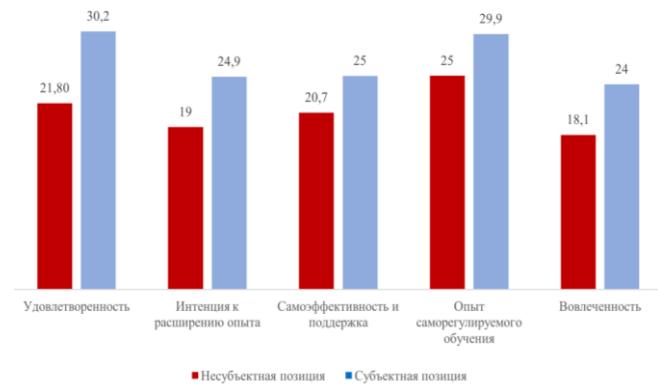


Рис. 4. Компоненты образовательного опыта студентов с разной выраженной позицией субъекта профессионального выбора

Студенты-субъекты профессионального выбора имеют высокий показатель удовлетворенности обучением по сравнению с средним уровнем данного показателя у студентов с невыраженной позицией субъекта ($U_{эмп} = 8,7$; $p \leq 0,01$). Можно предположить, что студенты, уверенные в своем выборе профессии, намеренные по ней далее работать, чувствуют больше личной удовлетворенности при оценке соответствия условий обучения ожиданиям, что определяет в целом их психологическое благополучие [18]. Для студентов с позицией субъекта профессионального выбора также характерен более высокий показатель интенции к расширению опыта ($U_{эмп} = 7,3$; $p \leq 0,01$). Это проявляется в большей выраженности намерений и стремлений студентов, связанных с участием в разнообразных активностях, способст-

вующих их развитию. Можно предположить, что субъектная позиция способствует стремлению в личностном и профессиональном росте посредством личностной мотивации: большая мотивированность при выборе и достижении результатов в профессии способствует большему стремлению познавать и изучать [2].

Студенты с выраженной субъектной позицией более уверены в своих силах и успехе в решении образовательных задач, больше верят в поддержку преподавателей и сокурсников ($U_{\text{эмп.}} = 6,08$; $p \leq 0,01$). Можно предположить, что вера в собственный успех возрастает, когда первокурсники чувствуют поддержку. Вера в поддержку со стороны нового окружения связано с открытостью к новому общению и опыту, когда студент чувствует себя в вузе на своем месте, уверен в том, что его профессиональный выбор соответствует его способностям, интересам, планам. Для студентов данной группы характерен и более высокий показатель в аспекте опыта саморегулируемого обучения ($U_{\text{эмп.}} = 5,98$; $p \leq 0,01$). Субъектность определяет большую автономию в образовании, а также – социальную ответственность и самостоятельность в обучении. Уверенность в собственном профессиональном выборе, намерение работать по специальности способствуют большей вовлеченности студентов с выраженной субъектной позицией в образовательный процесс ($U_{\text{эмп.}} = 7,6$; $p \leq 0,01$), что проявляется в усилиях, которые они прилагают в своей образовательной деятельности. Они имеют более устойчивое и позитивное состояние, связанное с учебой. Для данных особенностей характерна активность и высокая умственная устойчивость [9].

Исследование академической самоэффективности показало, что по всем компонентам студенты с субъектной позицией демонстрируют более высокие показатели (рис. 5).

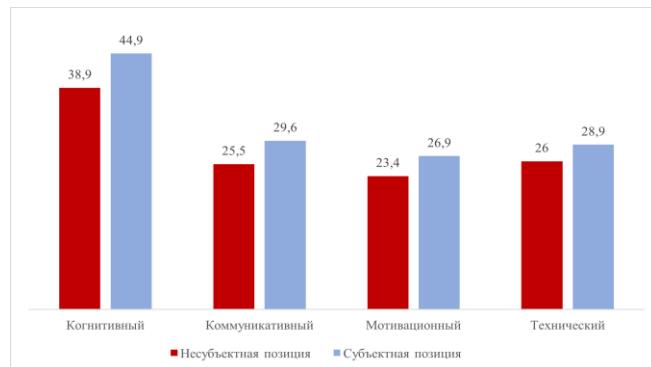


Рис. 5. Компоненты академической самоэффективности студентов с разной выраженностью позиции субъекта профессионального выбора

При разной выраженности позиции субъекта профессионального выбора компоненты академической самоэффективности выражены на среднем уровне: с тенденцией к высокому – у студентов с субъектной позицией и с тенденцией к низкому – у студентов с несформированной субъектной позицией. При том, что по всем компонентам различия статистически значимы, наибольшая разница отмечена в когнитивном компоненте: студенты с выраженной субъектной позицией больше уверены, что справятся с поставленными академическими задачами ($U_{\text{эмп.}} = 5,03$;

$p \leq 0,01$). Снижение показателей в коммуникативном и мотивационном блоках у студентов обеих групп исследователи связывают с рисками эмоционального выгорания студентов в процессе обучения [16].

Для изучения вопроса, существует ли связь и какая она между субъективными основаниями выбора профессии и компонентами образовательного опыта студентов, а также их академической самоэффективности был проведен корреляционный анализ, который показал, какие компоненты имеют наиболее сильные связи (рис. 6).

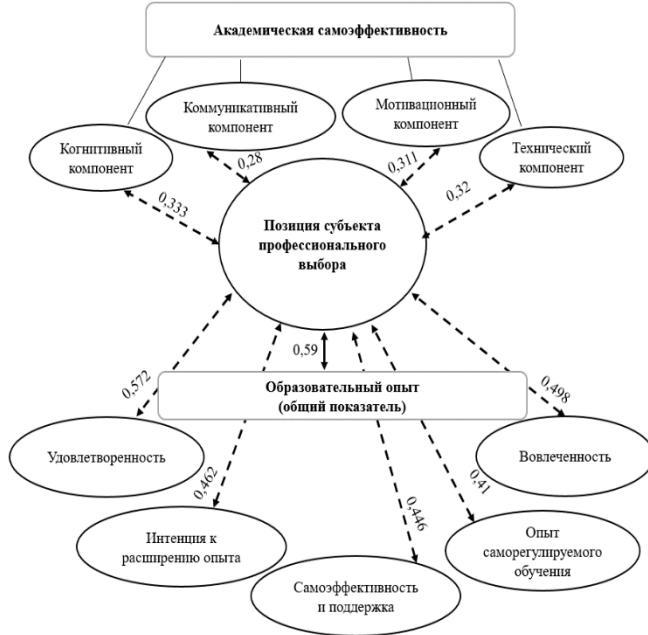


Рис. 6. Корреляции показателя позиции субъекта профессионального выбора, компонентов образовательного опыта студентов (ООС) и академической самоэффективности

Таким образом, можно наблюдать достаточно умеренные связи ($p \leq 0,01$) выраженности позиции субъекта выбора профессии со всеми компонентами образовательного опыта студентов. Максимальная связь среди представленных наблюдается между субъектной позицией и удовлетворенностью студентом обучением в вузе. Возможно, студент, который осознанно выбирал свой профессиональный путь, соотнося характеристики профессии со своими возможностями, интересами и целями, в выбранном направлении профессиональной подготовки действительно чувствует себя на своем месте: ему понятны формы обучения, окружение, так как при выборе он учитывал, как положительные стороны профессии и обучения, так и риски. Для более дифференцированного рассмотрения выявленных взаимосвязей был проведен корреляционный анализ отдельных субъективных оснований выбора профессии с всеми компонентами образовательного опыта студентов. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, наибольшие корреляции получились между удовлетворенностью обучением и уверенностью в сделанном профессиональном выборе, а также – в оценке соответствия профессии ожиданиям студента. В целом для всех компонентов ООС наибольшие корреляции получены с таким основанием выбора профессии, как «оценка степени соответствия выбранной профессии ожиданиям, интересам и планам студента», а наименьшие

– с намерением работать по специальности после окончания вуза. Данный факт наводит на мысль о возможном переживании кризиса выбора профессии студентами, а также – возможным отставанием образовательных программ от изменений на рынке труда.

ТАБЛИЦА 1. КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ (R_s) СУБЪЕКТИВНЫХ ОСНОВАНИЙ ВЫБОРА ПРОФЕССИИ С КОМПОНЕНТАМИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ОПЫТА СТУДЕНТОВ

Компоненты ООС	Субъективные основания выбора профессии			Уровень значимости
	Уверенность	Намерения	Оценка соответствия	
Удовлетворенность	,519	,457	,513	$p \leq 0,01$
Интенция к расширению опыта	,444	,343	,437	$p \leq 0,01$
Самоэффективность и поддержка	,407	,333	,411	$p \leq 0,01$
Опыт саморегулируемого обучения	,396	,298	,388	$p \leq 0,01$
Вовлеченность	,44	,383	,48	$p \leq 0,01$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор профессии и пути ее освоения – актуальная задача для человека практически любого возраста. Но, если взрослый человек принимает решение о смене профессии, выходя на новый цикл самоопределения, имея определенный опыт, как профессиональный, так и жизненный, то выпускник школы стоит перед сложным выбором, определяющим его взросление. Эмоциональный накал данной ситуации приводит порой к отказу от принятия решения или спонтанности данного процесса. При отсутствии опыта молодой человек может опираться на собственные внутренние ресурсы: свои способности, интересы, желания, умения, знания. Способность рефлексировать свои достоинства и ограничения, восприятие жизненных трудностей как вызов для дальнейшего саморазвития и самосовершенствования, – все это необходимые основания для становления молодого человека как субъекта своего жизненного пути и своих жизненных выборов.

Результаты проведенного исследования, участниками которого стали студенты ряда российских вузов, показали, что только у трети из них позиция субъекта выбора профессии сформирована. Именно для них характеры уверенность в совершенном выборе, твердость намерений работать по специальности после окончания обучения в вузе, высокая оценка соответствия требований профессии их внутренним ресурсам и целям. Обучение в вузе студентов с сформированной позицией субъекта профессионального выбора более благоприятно и успешно, о чем свидетельствуют выявленные значения всех компонентов образовательного опыта и академической самоэффективности. При этом наибольшая связь этих компонентов обнаружена с таким основанием выбора профессии, как «оценка соответствия будущей профессии собственным способностям, интересам, ожиданиям, жизненным целям». Это, в свою очередь обу-

словливает актуальность психолого-педагогического сопровождения студентов в развитии их способностей к самопознанию и саморазвитию. Одной из форм такого сопровождения являются ориентированные на формирование мягких навыков у студентов дисциплины психологического содержания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волгина Т.Ю. Адаптация студентов к обучению в педагогическом вузе: трудности, проблемы, их решения // Вестник Омского государственного педагогического университета. – 2017. – № 5. – С. 56-63.
2. Истратова О.Н. Адаптация к вузу студентов с разной выраженностью позиции субъекта профессионального выбора // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2022. – Т. 11, № 1 (38). – С. 45-49. – DOI: 10.57145/27128474_2022_11_01_09.
3. Лызь Н.А., Истратова О.Н., Голубева Е.В. Работающие студенты: образовательная успешность и субъективное благополучие // Высшее образование в России. – 2023. – Т. 32, № 2. – С. 80-96. – DOI: 10.31992/0869-3617-2023-32-2-80-96.
4. Андреева А.С. Три измерения взрослости в XXI веке: ответственность, свобода и забота // Социологические исследования. – 2023. – № 7. – С. 105-116. – DOI: 10.31857/S013216250023698-0.
5. Литвинова А.В., Савельева Ж.В. Взрослость в оценках молодежи: результаты социологического исследования // Казанский социально-гуманитарный вестник. – 2023. – № 2 (59). – С. 25-28. – DOI: 10.26907/2079-5912.2023.2.25-28.
6. Манукян В.Р. Специфика кризисов профессионального развития на разных этапах обучения в вузе // Вестник СПбГУ. Сер. 12. – 2012. – Вып. 3. – С. 62-69.
7. Лабынцева И.С. Особенности динамики учебной деятельности студентов с разным отношением к профессии: дисс. ... канд. психол. наук: 19.00.07; [Место защиты: Юж. федер. ун-т]. – Ростов-на-Дону, 2013. – 163 с.
8. Мусаева М.С.М., Ахмадова Т.Х., Озиева Л.С. Теоретические аспекты проблемы осмысливания студентами собственного профессионального выбора // Проблемы современного педагогического образования. – 2022. – № 76-1. – С. 223-226.
9. Guo J. Building bridges to student learning: Perceptions of the learning environment, engagement, and learning outcomes among Chinese undergraduates // Studies in Educational Evaluation. – 2018. – Vol. 59. – P. 195-208. – DOI: 10.1016/j.stueduc.2018.08.002.
10. Волочкин А.А. Успеваемость и когнитивное развитие в зависимости от учебной активности школьника // Вестник Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. Сер. № 1. Психологические и педагогические науки. – 2015. – № 1. – С. 87-97.
11. Лызь Н.А., Голубева Е.В., Истратова О.Н. Образовательный опыт студентов: концептуализация и разработка инструмента оценки качества образования // Вопросы образования. – 2022. – № 3. – С. 67-98. – DOI: 10.17323/1814-9545-2022-3-67-98.
12. Малошонок Н.Г. Студенческая вовлеченность в учебный процесс: методология исследований и процедура измерения // Социологические исследования. – 2014. – № 3 (359). – С. 141-147.
13. Меркулова О.П. Удовлетворенность студентов получаемым образованием: методики диагностики и взаимосвязанные факторы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер.: Акмеология образования. Психология развития. – 2015. – Т. 4, № 1. – С. 9-12.
14. Лызь А.Е., Лызь Н.А., Нещадим И.О. Успешность обучения в вузе: опыт студентов технических направлений // Современные проблемы науки и образования. – 2022. – № 4. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=31915> (дата обращения: 03.07.2024).
15. Истратова О.Н. Взаимосвязь образовательного опыта студентов с их субъективным благополучием // Вестник РГГУ. Серия: Психология. Педагогика. Образование. – 2024. – № 1. – С. 78-91. – DOI: 10.28995/2073-6398-2024-1-78-91.
16. Гаура С.В., Гаура О.А. Опыт оценки академической самоэффективности студентов-медиков. // Новое в психолого-педагогических исследованиях. – 2006. – № 3 (43). – С. 37-47.
17. Fernandez-Rio J, Cecchini JA, Méndez-Giménez A, Mendez-Alonso D, Prieto JA. Self-Regulation, Cooperative Learning, and Academic Self-Efficacy: Interactions to Prevent School Failure. Front Psychol. 2017 Jan 19;8:22. – DOI: 10.3389/fpsyg.2017.00022. PMID: 28154544; PMCID: PMC5243853.
18. Чаплин А.В., Шацкая С.С. Факторы, влияющие на самоэффективность личности // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 11-6. – С. 991-993.

Современная коммуникация: интенциональность, перформативность, медийность

Быкасова Лариса Владимировна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
moeve-25-moeve@yandex.ru

Опрышко Анна Анатольевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
oprishkoaa@sedu.ru

Самойлова Александра Николаевна
Ростовский государственный
экономический университет (РИНХ)»
Таганрог, Россия
s_a_n_l@mail.ru

Аннотация. Цель данной статьи: выявление значения коммуникации в подготовке современных специалистов в высшей школе. Задачи исследования: определить роль развития коммуникативных навыков субъекта образования; рельефно обозначить влияние дискурсивности образовательных практик на формирование коммуникации; сформулировать основные принципы коммуникации в высшей школе. Применение индуктивного подхода позволяет авторам верифицировать концептуальные идеи, парадигмальные установки и явления в теории и на практике.

Abstract. The purpose of the article: to identify the importance of communication in the training of modern specialists in higher education. Objectives of the study: to determine the role of development of communication skills of subjects of education; highlight the influence of discursivity; develop communication practices; formulate the basic principles of communication in higher education. The use of an inductive adapter allows authors to verify conceptual ideas, paradigmatic attitudes and phenomena in theories and examples.

Ключевые слова: коммуникация, субъект, интенциональность, перформативность, медийность.

Key words: communication, subject, intentionality, performativity, media.

О значимости феномена «коммуникация» свидетельствует обращение исследователей к анализу его дискурсивной сущности. Различные аспекты коммуникации изучали М.В. Богуславский, Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов; к проблемам типологии экспертизы в области коммуникации образования обращались С.Л. Братченко, Н.С. Макарова, Г.Н. Прозументова; оценка коммуникации являлась зоной научных интересов Э.Р. Латыповской, В.Г. Ледяевой, Л.Л. Любимова и др.

Во второй половине XX в. коммуникация стала предметом междисциплинарных исследований: роль коммуникативной личности в разнообразных дискурсах изучал М.М. Бахтин; общие модели использования слова были предметом анализа Н.Д. Арутюновой; когнитивный, прагматико-мотивационный и речевой опыт личности фундаментально исследовал Л.С. Выготский; анализ коммуникации в политической сфере, в искусстве являлся областью изучения Р. Барт, У. Эко; социальные поля коммуникации представлены в работах П. Бурдье; употребление единиц языка, их речевая актуализация интересовали П. Серио; математическая теория коммуникации

разрабатывалась ученым К. Шеноном; коммуникация как средство управления «в машинных и человеческих системах» освещалась в трудах Н. Винера и т.д.

Исследуя закономерности процессов самоорганизации систем различной природы, отметим, что роль коммуникативно-диалогового канала между математическим, естественнонаучным и социальным познанием играет синергетика. Изучая исторические и социальные общности людей (род, племя, народность, нация и т.д.), ученые рефлексируют ядро научного и бытийного познания, которым является коммуникация.

Для выявления значимости коммуникации как современной образовательной технологии в области подготовки инженерных кадров обратимся к дефиниции основных концептов, вводимых в канву статьи.

Концепт «коммуникация» голографичен по своей природе, в связи с чем рассмотрим его основные коннотационные акцентуации на примере нескольких наук, формирующих мировоззрение современного субъекта образования:

а) философия. Коммуникация в философии – это процесс, в котором Я становится действительным как самость благодаря тому, что оно обнаруживает себя в другом. Теория информации использует понятие коммуникации в смысле механической передачи сообщений, вследствие чего настоящая коммуникация может состояться только в том случае, если передающее и приемное устройства – это человеческие субъекты и относятся друг к другу как Я и Ты [1]. Благодаря философскому обоснованию значимости коммуникации и необходимости ее дальнейшей реализации (как инновационного модуля) происходит встраивание коммуникации в структуру современной вузовской профessionализации [2];

б) лингвистика. Коммуникация в лингвистике – это специфическая форма взаимодействия людей в процессе их познавательно-трудовой деятельности. Человеческие формы коммуникации характеризуются, главным образом, функционированием языка. Благодаря наличию знаковой функции коммуникация является важнейшим механизмом становления индивида как социальной личности, проводником установок данного социума. Коммуникация – это социальный процесс, поэтому она служит формированию общества в целом, выполняя в нем связующую функцию [3];

в) педагогика. Коммуникация в образовании – это совокупность способов, приемов, режимов и форм передачи необходимой учебной информации от педагога к обучаемому [4]. С определенной долей условности мы полагаем, что современное образование в многообразии имеющихся технологий – это и есть коммуникация, так как в образовательных практиках представлены такие элементы, как:

- общение (виды, средства, функции общения и т.д.);
- методики (креолизация языков, стили, кодирование и декодирование информации и т.д.);
- средства (вербальные, невербальные, проксемика, кинестетика, такесика, просодика и т.д.);
- приемы (письменное, визуальное, аудиальное общение и т.д.);
- искусственная среда (окружение, изменяемая проекция, континуум, геометрия и т.д.);
- учебно-методические комплексы (текст, моделирование, интеракция, трансакция и т.д.);
- компетенции (цели, сферы, готовность к общению, готовность к речевому взаимодействию и т.д.);
- – верbalный и невербальный дискурс и т.д. Если коммуникация исчезает, то образование перестает выполнять присущую ему миссию, перерастая в совокупность приказов, директив и аксиом [5];

г) психология. Коммуникация в психологии – это процесс обмена информацией между людьми [6]. Коммуникация в системе человек-человек происходит в коммуникативной ситуации, при этом создающий коммуникацию – это коммуникатор, определяющий цель и задачи, т.е. смысл коммуникации, в то время как получатель информации – это реципиент, так как на него направлено воздействие в процессе коммуникации для мотивации совершения какого-либо действия (успокоить, ободрить, активизировать, внушить и т.д.) [7].

В психологии коммуникация – это феномен, к которому ученые проявляют повышенное внимание, так как коммуникация чаще всего представлена верbalным общением, а оно, в свою очередь, является многогранным процессом, отвечающим за:

- социализацию человека во взаимодействии с окружающими людьми;
- моделирование поведения субъекта;
- формирование нравственных образцов и моральных установок;
- влияние, оказываемое на субъекта опытным педагогом, наставником, тыотором;
- обмен информацией и т.д. [8];

д) социология. Коммуникация в социологии – это практическое решение проблем взаимоотношений между людьми и социальными общностями [9]. В связи с тем, что наступила эпоха глобализации, интенсивно развиваются средства массовой информации (СМИ), происходит дифференциация сфер жизни человека, возникают

иные от имеющихся социальные институции, возникла необходимость

- анализа коммуникации как социально-обусловленного процесса;
- связи объектов материального и духовного мира;
- рассмотрения роли коммуникации в поддержании социального единства.

В социологии концепт «коммуникация» используется для обозначения межличностного и массового обмена информацией (идеи, оценки, эмоции) посредством различных символических средств (визуальные и аудиовизуальные источники: коммуникативные комплексы, фильмы, аудиовизуальные слайды, мультимедиа, сетевые образовательные ресурсы и т.д.).

Социология обращает внимание на роль коммуникации в развитии широкого спектра антропологических практик, представленных совокупностью социальных, духовных, психологических, соматических и др. практик, и являющихся неотъемлемой частью процесса образования, в котором субъект получает сумму представлений о человеке, его природе, смысле и целях его существования, о его месте в мире и т.д.

В табл. 1 рассмотрим смысловую представленность концепта «коммуникация» в различных науках.

ТАБЛИЦА 1. ТИПОЛОГИЯ КОНЦЕПТА «КОММУНИКАЦИЯ»

Философия	Лингвистика	Педагогика	Психология	Социология
Процесс обнаружения себя в другом	Форма взаимодействия людей	Передача информации от педагога – обучаемому	Обмен информацией между людьми	Межличностный и массовый обмен информацией

С помощью формализации данных все встречающиеся в научных книгах дефиниции концепта «коммуникация» мы сгруппировали, проанализировали и выявили, что в современных концепциях представлены различные взгляды на данный многогранный феномен, но смысловая наполненность является собой достаточно прозрачную и, в то же время, жесткую структуру в горизонтальном сечении. Как следует из таблицы, коммуникация – это процесс, форма взаимодействия, передача и обмен информацией между субъектами и / или группами людей.

Важную роль в процессе коммуникации в вузе выполняет преподаватель, так как:

- применяет новый тип подачи информации;
- расширяет спектр применения в практической работе социальных сетей;
- использует геймификацию;
- внедряет в образовательный процесс искусственный интеллект;
- расширяет рамки мобильного электронного образования;
- использует дополнительную виртуальную реальность;

- применяет машинное обучение;
- учитывает различные факторы (социальные условия, культурный контекст);
- диагностирует процесс обучения, отвечающий интересам субъекта;
- проводит интервенции для актуализации знаний обучаемого;
- обрабатывает задания по алгоритму;
- оценивает выполненное задание;
- обсуждает уровень креативности созданного продукта (коммуникации).

Коммуникация – это симбиоз различных видов, систем и каналов общения, повышающих

- 1) возможность охвата целевой аудитории;
- 2) степень воздействия на слушателя;
- 3) уровень создания моделей верbalного, невербального, смешанного поведения субъекта коммуникации.

Современный субъект образования развивает самостоятельность мышления, стремится повысить культуру, неконфликтно адаптироваться к социуму, противостоять возникающим киберугрозам и кибератакам. При помощи широкого спектра средств коммуникация способствует формированию определенных социокультурных конвенций, координируя цели, стратегии, тактики диалогического общения у *homo sapiens*.

Коммуникация – это, по сути, соединение различных информационных кодов (вербальные/невербальные, иконографические, технические и т.д.), а также учет правил взаимодействия в коммуникативном акте. Именно поэтому считаем правомочным роль данного феномена:

- 1) в расширении источников нарративов, границ и качества коммуникативного процесса;
- 2) в развертывании практики социального проектирования современного субъекта;
- 3) в описании коммуникации с точки зрения современной мутации широкого спектра модусов: текстовых, аудиовизуальных, пространственных и др.;
- 4) в апперцепции субъектом воспринимаемой информации в процессе общения (диалога, полилога);
- 5) в детерминации его рекурсивности, т.е. постоянном обновлении и модификации, что, безусловно, способствует амплификации образования и развитию принципов синектики (поиск различных видов аналогий):

- общеметодологические (гуманизм, интегративность, развивающий характер обучения);
- специальные (гармоничное развитие личности, связь с наукой, политехнизм);
- в формировании этики ценностей и этики деловых отношений коммуникантов как в режиме offline, так и в режиме online.

Коммуникация – это важнейшая часть культуры, понимаемая нами как воплощение своеобразного процесса на земле, отдельные продукты которого являются только человеческими творениями и никогда не могли быть порождены природой [10]. В связи с тем, что значительная часть жизни современных молодых людей проходит в сети, следует уделять внимание условиям формирования культуры субъекта XXI века, ознаменовавшегося быстрым развитием цифровизации и формированием у субъекта образования двух видов компетентностей: сетевой (способность личности существовать в цифровой среде) и цифровой компетентности (административная и уголовная ответственность субъекта за поведение в сети).

В связи с последним тезисом считаем, что современная коммуникация неразрывно связана с правовой культурой субъекта. Вуз – это молодежная студенческая аудитория с одной стороны и профессорско-преподавательский состав (ППС) – с другой. Преподаватель играет важнейшую роль в коммуникации, так как именно он является транслятором имеющихся у субъекта интеллектуальных массивов, эталоном поведенческих норм и нравственных образцов. Преподаватель задает вектор коммуникации, обеспечивая ее научность, актуальность, объективность, связь с жизнью, что обеспечивает студенческой аудитории возможность осуществлять социальный сёрфинг благодаря формируемым на занятиях или во внеаудиторной работе коммуникативной компетенции.

Сформированность коммуникативной компетентности будет не полной без ознакомления субъекта образования с правом прессы, радио и телевидения, кинематографии, правом информационных агентств. Данный тезис манифестирует

- 1) изменения в подходах к организации процесса коммуникации современного обучаемого;
- 2) трансформацию современного образовательного дизайна;
- 3) развертывание образовательной палитры;
- 4) расширение рамок человекоразмеренной коммуникации;
- 5) активность когнитивной деятельности субъекта образования, фундирующей появление оригинальных мыслеформ;
- 6) связь коммуниканта с социумом, его отдельными представителями, олицетворяющими отличные от имеющихся в обществе социальные позиции и умозаключения, декларирующие спорные, но жизнеспособные поступаты.

Рефлексию стратегических и тактических особенностей развития коммуникации в отечественной высшей школе осуществим с применением индуктивного подхода, что будет способствовать

- формулировке дискурса интенциональности: смыслообразующей устремленности сознания к миру; смыслоформирующей направленности сознания на предмет; связи с проблематикой языка /теория речевых актов/ и сознания;

- обоснованию основных векторов перформативности, определяемых действенностью и эффективностью образовательных инициатив. Перформатив создает определенную социальную, коммуникативную или межличностную ситуацию, в то время как соответствующее перформативу действие осуществляется самим речевым актом в процессе субъект-субъектной коммуникации;

- дополнению набора медийных компетенций, необходимых для успешной коммуникации.

Формирование коммуникации / коммуникативных навыков способно обеспечивать

- развитие интеллектуального и общекультурного уровня субъекта;
- совокупность духовных и материальных ценностей субъекта благодаря применению медийных технологий в процессе обучения;
- практико-ориентированную подготовку будущего выпускника, обладающего набором специализированных знаний;
- развитие креативного мышления субъекта образования;
- индивидуализацию образования субъекта (выбор траектории, скорость прохождения курса, форма обучения и др.);
- приобщение субъекта к более глубокому постижению полиментальности социума, к достижению синергетического эффекта.

Для подготовки инженерных кадров преподавателям высшей школы важно освоить основные механизмы коммуникации (реактивное образование, регрессия, сублимация, рационализация и т.д.), которые мы считаем целесообразным рассмотреть с позиции следующих принципов:

1. Стереотипизация и социальная инклюзивность (субъект принимает стереотипы культуры в обществе и бесконфликтно входит в круг общения).

2. Активность субъекта (освоение существующих норм, правил, «духа» рекреации и т.д.).

3. Преемственность и последовательность (взаимосвязь чувственного и логического, рационального и иррационального, сознательного и бессознательного в поведении субъекта).

4. Интегративность (в искусственно создаваемой среде сосредотачиваются лучшие образцы в мотивах поведения субъекта).

5. Метапредметность (совокупность получаемых в искусственной цифровой среде знаний в горизонтальной и вертикальной структурах).

Обратимся более детально к феноменам перформативности, интенциональности и медийности как элементам модели развития коммуникации.

I. Интенциональность в феноменологии – это первичная смыслообразующая устремленность сознания к миру [11]. Интенции субъекта осуществляются через его представления, эмоции, суждения. На наш взгляд, наи-

более важными интенциями для успешной коммуникации являются признание / непризнание; добро / зло; симпатия / антипатия, так как позволяют субъекту ориентироваться в окружающей реальности, идентифицировать и дифференцировать имеющиеся в практике образования, в жизни социума явления.

II. Перформативность определяется действенностью, эффективностью и директивностью, поэтому разворачивание коммуникации происходит с помощью иллоктивной функции, заключающейся в присвоении субъектом норм и образцов поведения, и перлокутивной функции (установление правил, определенных поведенческих норм) [12]. Благодаря перформативности образования обеспечивается реализация процессов коммуникации, презентации, оперативности и т.д.

III. Медийные ресурсы – это совокупность накопленных на носителях записи информационных продуктов средств массовой информации (СМИ), с целью их дальнейшего использования. В связи с растущей ролью сети Интернет, закономерно появление требований к несанкционированному использованию фотографий, видеороликов, аудиозаписи и т.д.

Медийные аспекты современной жизни (социальные сети, онлайн платформы, гаджеты и т.д.) способствуют развитию новых образовательных треков в становлении субъекта, дистрибуции внимания к стратегическим и тактическим инициативам преподавателей.

Коммуникация, как известно, происходит в системе человек-человек, а наиболее применяемой формой ее организации является тренинг. Тренинг в коммуникации – это метод обучения, направленный на развитие знаний, умений и навыков (в том числе социальных). Разворачивание онтологической доминанты концепта при подготовке будущих специалистов в инновационном модуле рассмотрим более подробно.

В практике современного образования тренинг – как инновационный метод обучения – может рассматриваться с точки зрения разных парадигм:

1) личностно-ориентированная (самораскрытие участников);

2) культурологическая (способ решения проблем участников тренинга);

3) когнитивная парадигма (активное обучение субъекта);

4) функционализм (отработка определенных умений и навыков);

5) бихевиоризм (при помощи положительного подкрепления формируются нужные стереотипы поведения) и т.д.

Отметим, что деление видов тренингов можно проводить по различным основаниям. В частности, по критерию направленности воздействия на субъект выделяются три основных типа тренингов:

• навыковый (формирование и выработка определенного навыка);

• психотерапевтический (изменения в сознании);

- социально-психологический тренинг (смена социальных установок, развитие умений и опыта в области межличностного общения).

В отечественной и зарубежной научно-педагогической литературе выделяют различные виды тренингов (гештальттренинг, социально-психологический, корпоративный тренинг, бизнес-тренинг и т.д.), однако коммуникативный вид тренинга имеет ведущее значение, так как многообразие подходов в обучении будущих специалистов с применением инновационных методов:

- 1) форматирует мышление студентов;
- 2) тренирует память, воображение;
- 3) развивает логику;
- 4) обеспечивает процесс коммуникации, помогая субъекту гармонизировать структуру личности, выработать поведенческий рисунок, инициирующий решение субъектом возникающих задач благодаря правильно выстроенной коммуникации.

Современный студент большую часть времени проводит в коммуникации с друзьями, преподавателями на различных платформах, поэтому появилась необходимость обращения к формированию цифровой культуры субъекта. Цифровую культуру мы, с определенной долей условности, рассматриваем в диаде как

- 1) систему возможностей, открывающихся благодаря использованию цифровых технологий;
- 2) совокупность духовно-душевных и ментальных свойств личности, направленных на освоение современного цифрового пространства и соблюдение принципов коммуникации и информационного права.

Расшифруем принципы более подробно. Так, принцип коммуникации подразумевает подлинность, непредвзятость, четкость, конкретность, корректность и т.д. транслируемого материала; принцип информационного права учитывает свободу поиска, получения, передачи, производства, распространения достоверной информации любым законным способом.

Считаем, что соблюдение цифровой культуры субъекта в процессе коммуникации будет способствовать

- 1) поддержанию общей духовной настроенности как отдельного обучаемого, так и группы молодых людей, участвующих в коммуникативном акте;
- 2) развитию физического и психического здоровья субъекта;
- 3) соблюдению молодежью законодательства, повышению уровня их правовой культуры.

Средства массовой информации (периодические печатные издания / газеты, журналы, альманахи, бюллетени и т.д./, сетевое издание, телеканалы, радиоканалы, телепрограммы, радиопрограммы, видеопрограммы, кинохроникальные программы и пр.) – важная часть массовой коммуникации общества, поэтому многочисленные документы задают геометрию современного медийного рынка, регламентируя его развитие и трансформации. В эпоху современности СМИ приобретают особую значимость, так как играют различные социальные и политические роли: организатора, коммуниканта, консолидатора общества, его просветителя.

Однако, у СМИ имеется и негативная сторона: отмечаемая отдельная дезинтеграция и дезинформация населения. Особенно опасно такое влияние на неокрепшую психику молодых людей, которые в силу возраста доверчивы и еще не в состоянии проводить селекцию передаваемой через СМИ информации, определять ее подлинность, объективность, ценность.

Резюмируя сказанное в статье, отметим следующее:

1. Коммуникация – это систематическое, планомерное, целенаправленное воздействие на сознание, поведение, воспитание и образование субъекта с целью его гармоничного развития в современном социуме.

2. Коммуникация личности включает спектр аксиологических, герменевтических, психологических, когнитивных ценностей, норм и принципов, что позволяет обеспечивать социализацию субъекта.

3. В концепт «коммуникация» структурно входят субконструкты: когнитивная коммуникация, коммуникация сетевого общения, эмоциональная коммуникация, что обеспечивает надежную социолокацию субъекта.

4. Важным показателем успешности коммуникации является реализация следующих принципов: понимание нравственных установок, знание норм поведения, сетевая и цифровая грамотность, правовая информированность для работы в сети.

5. Основными критериями оценки уровня сформированности коммуникативных навыков считаем:

- показатель готовности субъекта к социально полезному поведению в сети;
- нетерпимость к аморальным поступкам, асоциальному поведению, дисциплинарным нарушениям;
- степень сформированности культурных навыков и умений;
- потребность в дальнейшем культурном совершенствовании.

6. Коммуникация (контакты, взаимодействие, связь между субъектами, средства массовой информации) состоит из трех основных компонентов – просодии, собственно вербальности и жестов/мимики. Наряду с коммуникацией для современного субъекта в образовании важны интеракция и социальная перцепция.

7. В организации процесса коммуникации значительную роль играет среда, т.е. специально организованные условия пребывания человека для его полноценного и гармоничного развития. Среда создается искусственно и может проектироваться для достижения различных целей: интеллектуальное, физическое, эстетическое и др. развитие субъекта.

8. Образовательная организация формирует обстановку и условия, способствующие развитию потенциала субъекта, обеспечивает его социализацию в стратифицированном обществе, коммуникацию с ровесниками и преподавателями, безопасность его учебы и жизнедеятельности. Рационально организованная среда является носителем культуры образовательного процесса в вузе;

9. Экспонирующий результат коммуникации – развитие апперцепции субъекта, что позволит сохранить его сакральный ландшафт, а также формировать у молодежи гражданственность, ответственность, чувство долга;

10. Дискурсивность формирования коммуникации (как одной из современных образовательных технологий в области подготовки инженерных кадров) определяется не только постоянным взаимодействием людей посредством использования спектра различных коммуникационных моделей, но и интенциональностью, перформативностью, медийностью, оказывающими влияние на максимальную реализацию потенциала субъекта образования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Философский словарь. – М.: Республика, 2003. – С. 140, 215.
2. Волков А.В., Волкова С.В. Homo educationandus в зеркале философской антропологии // Перспективы науки и образования. – 2020. – № 6 (48). – С. 22-30. – DOI: 10.32744 / pse.2020.6.2
3. Лингвистический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – С. 233.
4. Даутова О.Б. Образовательная коммуникация: учебно-методическое пособие. – Изд-во: Каро, 2018. Серия: Петербургский вектор внедрения ФГОС НОО. – 286 с.
5. Bykasova L.V., Podberezny V.V., Zarubina R.V. Modern education upgrade // ЦИТИСЭ. – 2020. – № 1 (23). – С. 476.
6. Гулевич О.А. Психология коммуникации. – М.: Московский психолого-социальный институт, 2007. – 384 с.
7. Выготский Л.С. Мышление и речь. – СПб.: Издательский дом Питер, 2020. – С. 56.
8. Латыпова, Э.Р. Общение как коммуникация // Молодой ученый, 2022. – № 51 (446). – С. 197-199. – URL: <https://moluch.ru/archive/446/98194/> (дата обращения: 03.09.2024).
9. Франц В.А. Управление общественным мнением: учебное пособие. – М.: Изд-во Юрайт, 2019. – 133 с.
10. Gibson D., Broadley T., Downie J., Wallet P. Evolving Learning Paradigms: Re-Setting Baselines and Collection Methods of Information and Communication Technology in Education Statistics // Educational Technology & Society. – 2018. – № 21 (2). – Р. 62-73.
11. Лиценко В.Г., Полицинская Е.В., Ергунова О.Т. Развитие командной компетенции у выпускников технических вузов на базе коллaborативного обучения // Перспективы науки и образования, 2021. – № 1 (49). – С. 92-112. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44852453>.
12. Горячева Е.А. Перформативные исследования в акторно-сетевой теории // Вестник РУДН. Серия социология. – 2013. – № 4. – С. 11.

Современный подход к математическому образованию инженеров (частное мнение)

Бажанов Николай Николаевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия

nmbazhanov@sfedu.ru

Аннотация. В работе излагается частное мнение о новой концепции в физико-математическом образовании (рассматривается только математическая часть проблемы) в подготовке современных инженерных кадров. Рассмотрены три уровня изучения математики: математика для жизни, математика для применения в профессии и математика для творчества; предложены подходы для достижения высоких результатов работы федерального университета.

Abstract. The paper presents a personal opinion on a new concept in physics and mathematics education (only the mathematical part of the problem is considered) in the training of modern engineering personnel. Three levels of studying mathematics are considered: mathematics for life, mathematics for application in the profession and mathematics for creativity; approaches are proposed for achieving high results in the work of the federal university.

Ключевые слова: двухуровневая система, базовый уровень, fundamentality, автономность университетов, автономность национальной системы образования, высшая математика.

Key words: two-tier system, basic level, fundamentality, autonomy of universities, autonomy of the national education system, higher mathematics.

В мае 2023 года Президент подписал указ «О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования» [1]. 9 августа опубликовано постановление Правительства, на основании которого с 1 сентября 2023 года в нашей стране дан старт эксперименту (пилотному проекту) по изменению уровней профессионального образования. Председатель Правительства подписал постановление, в котором обозначены основные принципы реализации этого проекта. Текст постановления можно найти здесь [2].

Не вызывает сомнения, что пилотный проект предназначен ввести в оборот новую национальную модель (систему) высшего образования. Переход планируется с 1 сентября 2025 года. «Мы считаем, что переход на обучение в рамках новой системы образования просматривается ориентировочно, с учетом экспериментов, в 2025 году, — сказал министр в ходе заседания расширенной итоговой коллегии Минобразования» [3]. Он добавил, что в рамках перехода к новой национальной системе образования необходимо ее исследовать в некоторых университетах, внести изменения во многие норматив-

ные документы федерального уровня, разработать новый перечень образовательных программ, новые государственные стандарты, отражающие глобальную цифровизацию, изменения в профессиональных стандартах и другие нестандартные новации. Важно отметить, что министр Минобразования высказался критически о существующей системе магистратуры и предложил обсудить введение академической и профессиональной магистратуры.

Отсутствие реальной университетской автономии (в традиционном, каноническом виде) порождает императивные требования руководства университета искать и предлагать «новые концепции», соответствующие новому вектору национального образования. Справедливости ради следует заметить, что, отказавшись от ненавистного многим ректорам Болонского процесса, мы строим свою, но также двухуровневую систему. Действительно, Минобрнауки предлагает опять два уровня: базисное и последипломное, что, выражаясь математическим языком, «с точностью до переобозначения», напоминает образовательную структуру, принятую в 1988 году в Болонье. Обсуждая современные образовательные технологии в области подготовки инженерных кадров, мы не можем пропустить ответ на главный вопрос: в рамках какой образовательной системы эти «современные образовательные технологии» реализуются. К сожалению автора, официальной позиции по главному вопросу пока нет, зато по экспоненте растут различные опросы и указания по всеместному внедрению в учебный вопрос т. н. искусственного интеллекта (ИИ). Чиновникам от образования ИИ представляется волшебной таблеткой, которая сразу решит все вопросы и проблемы качественного инженерного образования. Однако это не так. Кстати, опасность завышенных ожиданий от применения ИИ, автор выразил в публикации [4].

Итак, современный подход к математическому образованию инженеров безусловно связан с архитектурой национальной образовательной системы, которая в настоящее время активно формируется. Причем после выступлений ректора МГУ 12 декабря 2023 г. на Общем собрании Российской академии наук и на открытии Всероссийского съезда учителей и преподавателей математики, приуроченного к 270-летию Московского университета, стало принято говорить о «новой концепции математического образования». Целесообразно на-

помнить, что в настоящее время действует Концепция развития математического образования в РФ, утвержденная соответствующим распоряжением Правительства РФ [5]. Не подвергая сомнению целесообразность разработки нового документа, который безусловно учит прогресс цифровых технологий и современного программирования, отметим лишь небольшую часть важных – на взгляд автора – тенденций, сложившихся в математическом образовании инженеров.

1. Формальный отказ от Болонской системы и «возврат» к отечественной подготовке инженерных кадров.

2. Сокращение учебных часов для изучения фундаментальных математических курсов да и самих курсов.

3. Очевидная профанация магистерской подготовки (широко не обсуждается, но на заседании расширенной итоговой коллегии Минобразования 2024 года министр высказался критически о существующей системе магистратуры и предложил обсудить введение академической и профессиональной магистратуры).

Остальные важные причины озвучены В.А. Садовичим и В.Н. Фальковым и здесь мы не будем их пересказывать, но добавим и обоснуем свои. Начнем с последней по счету.

По словам главных идеологов новой концепции математического образования, национальные цели развития страны порождают три уровня изучения математики: математика для жизни, математика для применения в профессии и математика для творчества.

Автор высказывает предположение, что математика «для жизни» отражает некие социально-прагматические цели населения и, конечно, не ставят во главу угла реальное изучение этой дисциплины. Примеров много: и различные схемы набора студентов любой ценой из колледжей, техникумов и даже профессиональных училищ. Эти студенты, будучи зачисленными в федеральный университет на инженерные направления подготовки, завершили свое обучения математики в 9 классе. К сожалению, подобные казусы не являются исключительными. Другой распространенный пример: зачисление в магистратуру и «обучение» в ней совершенно случайных людей. Здесь мотивация для большинства – продвижение по государственной или военной службе. Министр В.Н. Фальков, вероятно, знает о низком качестве подготовки многих (не всех) магистров, но кардинально изменить сложившуюся систему не в состоянии. Выскажу банальное предположение: математика для жизни – это практика устного счета. Калькуляторы в школе должны использоваться только в ситуациях, которые определены учебной программой. Кроме того, устный счет развивает оперативную память, когнитивные способности и, в определенной мере, логику. Личное восприятие этого уровня изучения математики вызывает параллель с «математикой через всю жизнь».

Математика для применения в профессии – самый дискуссионный случай, особенно когда речь заходит о фундаментализации современного физико-математического образования. В термин «современное» я вкладываю все технологические достижения software, и – в первую очередь – тотальную цифровизацию. Представляется полезным привести цитату из выступления академика А.Н. Крылова

«О подготовке специалистов» в 1941 году. «Чем и как надо обосновать этот выбор? (речь идет о содержании и объеме учебных дисциплин – пояснение мое Н.Б.). Обыкновенно в учебном деле для этого служат «учебный план» и «программы курсов» с их «целевыми установками». Но мне кажется, что здесь упускается самое главное: 1) способность студента к усвоению преподаваемого и 2) род деятельности, которой студент стремится себя посвятить в будущем соответственно своей склонности. Это упущение ведет к крупным ошибкам.

В основу учебных планов кладутся программы. Каждая программа составляется профессором, заведующим кафедрой и преподавателями по этой кафедре, т.е. специалистами по данному предмету, и они всегда склонны изложить предмет «в полном его объеме», как бы забывая, что сами они в своей преподавательской деятельности изучали свой предмет, может быть, 15, 20, 25 лет, а то и более, а студент на изучение этого предмета может уделить лишь небольшую часть года или полугодия, ибо одновременно студенту надо изучить и ряд других предметов, в равной мере обязательных, и сдать по ним зачеты и экзамены.

Сдав такой зачет или экзамен, студент стремится как можно скорее «освободить голову» для сдачи зачета или экзамена по следующему предмету, ибо человеческая способность усвоемости не бесконечная, а ограниченная.

Уже давно было сказано, что целью университетского образования является «научить учиться» [6]. Цифровая трансформация относится к национальным целям развития. Одной из важных работ по данной проблеме – по мнению автора – является публикация Е.В. Брызгалиной, в которой «трансформация отечественного университетского образования связана не с отказом от фундаментальности, а с переосмыслением сущности и форматов взаимодействия профессионального образования с наукой, с акцентом на особенности современного этапа научного познания и тренды развития технонауки, объединяющей исследования, технологии и бизнес» [7]. Однако особый интерес представляет точка зрения Министра науки и высшего образования. Он сформулировал «пять принципов современного высшего образования в России. Третьим из них названа фундаментальность. Сочетание практической подготовки и фундаментальности всегда было предметом дискуссий в академической среде. Однако в настоящее время главным критерием является повышение производительности труда, причем этот показатель назван национальным приоритетом. Без фундаментальности высшее образование превращается в подготовку исполнителей и потребителей, тех, кто работает по уже существующим технологиям, кто способен только пользоваться чужими решениями, касается ли это инженеров или менеджеров. А нам нужны творцы!» [8].

Обратим внимание на то, что каноническое определение фундаментальности (условно говоря «фундаментальность советской высшей школы») не совсем корректно применять в современных условиях. И одной из главных причин этого является цифровизация и бытия, и образования, и науки, и производства. По частному мнению автора, раньше фундаментальность изучения математики связывалась с глубиной проникновения в математические институты с изучением нетривиальных

теорем (вспоминаю первый курс института и доцента А.Д. Сидоренко, который не преподавал очевидную, но все же высшую, математику, и часто приносил на практические занятия только что вышедшие препринты своих фундаментальных математических исследований. Так уж вышло, что вместо интегрального исчисления мы изучали теорию градиентных катастроф. Были эти знания фундаментальными? Безусловно да. Нужна ли такая фундаментальная математика будущему инженеру-математику? Ответ не однозначный). Поэтому фундаментальность в современном понимании – это прежде всего возможность творческого применения математических знаний с помощью современных информационных технологий, которые изучаются одновременно с методами классической математики, неотделимы друг от друга и представляют собой новую учебную дисциплину «высшая цифровая математика».

Завершим этот раздел статьи цитатой выступления министра В.Н. Фалькова на конференции 28 октября 2022 г., которую организовал и проводил Сбербанк. Именно там обозначилась проблема оптимального сочетание фундаментальности и гибкости. По словам министра «само значение слова «фундаментальность» по отношению к высшему образованию изменилось. Современная фундаментальность, во-первых, не задаётся централизованно, даже регулятором. Моё мнение, что фундаментальность имеет некие границы, и университеты разного профиля эту фундаментальность могут корректировать» [9]. На взгляд автора, это очень важное допущение, которое в ближайшем будущем выделит инновационные, предпринимательские (не в смысле коммерции, но в смысле коллективной предпринимательской акции, направленной на трансформацию вуза) университеты из общей массы учебных заведений, работающих исключительно по инструкциям «сверху». Справедливости ради заметим, что и сейчас у университетов гораздо больше свободы, чем было ранее, однако синдром чеховского героя – учителя греческого языка Беликова («Оно, конечно, так-то так, все это прекрасно, да как бы чего не вышло») не позволяют многим университетам сделать прорыв в будущее. Уместно заметить, что вопросам реальной университетской автономии и ее влияние на качество современного инженерного образования, посвящены несколько публикаций автора [10, 11].

Еще один уровень изучения математики авторы новой концепции назвали «математика для творчества». На самом деле – это подраздел в профессиональной деятельности. Выскажу предположение, что математика для творчества – это то, что востребовано и должно изучаться на втором, постдипломном, уровне. Если использовать пока существующие термины и категории, то математика для творчества – базовый предмет магистратуры. Не буду повторяться, но содержание и, главным образом, реализация магистерских программ очень далеки от такого уровня математики. Некоторые причины такого положения я упомянул в разделе «математика для жизни». Математика для творчества, конечно, не для всех. Также как и магистерский уровень образования да и высшее образование в целом. На этом очевидном, огорчительном для многих не способных учиться в высшем учебном заведении студентов, но справедливом мнении, переходим к формулировке выводов и рекомендаций по теме статьи.

1. Современный подход к математическому образованию инженеров безусловно коррелирует с существующей системой профессионального образования, которая в настоящее время претерпевает изменения. Автор умышленно отказался от прилагательных «существенные или кардинальные», так как планируемая «новая национальная модель высшего образования» по-прежнему двухуровневая и в этом смысле совершенно не отличается от Болонской.

2. В работе рассмотрены три уровня изучения математики: математика для жизни, математика для применения в профессии и математика для творчества. Для каждого уровня автор высказал частные мнения, которые могут быть оспорены или даже опровергнуты с помощью неизвестных ему фактов. Однако

2.1. Магистратура в существующей ныне форме не эффективна и должна быть существенно изменена. Мотивацию поступающих в магистратуру, качество преподавания и содержание программ (например, в магистратуре уровень математики – математика для творчества) следует кардинально изменить, например, с помощью полного отказа от бюджетных мест. Это непопулярное, но вынужденное решение приведет к реальному качеству подготовки специалистов, а не выполнение эфемерных КЦП.

2.2. Университет должен pragmatically и совершенно однозначно сформулировать свое видение фундаментальности математики и физики, хотя бы на уровне укрупненных групп специальностей.

2.3. Математика любого уровня изучается совместно с ИТ-технологиями, причем разделы высшей математики, последовательность их изложения и глубина изучения (см. п.2.2.) могут отличаться от канонических, традиционных рекомендаций.

3. Возможно федеральному университету постепенно нужно отказаться от подготовки студентов первого уровня (в настоящее время бакалавриат) или существенно сократить набор. Задача федерального университета – подготовка специалистов мирового (и выше) уровня в академической и профессиональной магистратуре, наука во всех ее проявлениях (от фундаментальных исследований до стартапов). Влияние на уровень физико-математической подготовки в школе – третья миссия университета.

4. И последнее. Законодательно закреплено, что «государство гарантирует и обеспечивает права каждого человека на образование», но это не означает, что любой гражданин в силу своих индивидуальных особенностей может успешно учиться в высшем учебном заведении: высшее образование не для всех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента РФ от 12.05.2023 № 343 (ред. От 26.06.2023) «О некоторых вопросах совершенствования системы высшего образования»// Собрание законодательства РФ, 15.05.2023, N 20, ст. 3535.
2. Распоряжение Правительства РФ от 24 декабря 2013 г. N 2506-р О Концепции развития математического образования в РФ.
3. В Минобрнауки обсудили, как будет реформирована система образования в стране//сайт Российского Союза Ректоров [Электронный ресурс]. – URL: <https://tsr-online.ru/news/2023/5/19/perehod-na-novuyu-model-vysshego-obrazovaniya-v-rossii-planiruet-sya-s-2025-goda/> (дата обращения: 07.01.2024).

4. Бажанов Н.Н. Искусственный интеллект: опасность завышенных ожиданий // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 9 (2023). – ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8677 http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_50_9_Bazhanov.pdf_3fa2a6a2ad.pdf eLIBRARY ID: 42519307.
5. Концепция развития математического образования в Российской Федерации с изменениями на 8 октября 2020 года//Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2013 года N 2506-р.
6. Крылов А.Н. О подготовке специалистов. Речь на совещании профессоров Кораблестроительного института 14 июня 1941 г. Повторена 1 октября 1941 г. на расширенном заседании Президиума АН СССР. Напечатана в "Вестнике АН СССР" (№ 9-10, 1941 г.) Воспоминания и очерки. Изд. АН СССР, М., 1956 г., стр. 622. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=54897288>.
7. Брызгалина Е.В. Фундаментальное образование в современном университете как ответ на современные вызовы // Вестник ВГУ серия: «Проблемы высшего образования». – 2021. – № 1. – С. 5-8.
8. Фальков назвал пять принципов национальной системы высшего образования. – URL: <https://www.pnp.ru/social/falkov-nazval-pyat-principov-nacionalnoy-sistemy-vysshego-obrazovaniya.html> (дата обращения: 26.05.2023).
9. Фальков В. Фундаментальность имеет границы, и университеты могут её корректировать. – URL: <https://skillbox.ru/media/education> (дата обращения: 26.05.2023).
10. Бажанов Н.Н. Система сдержек и противовесов в управлении современным университетом // Теория и практика подготовки менеджеров по развитию в современных университетах (По материалам реализации международного межвузовского проекта). Научно-методические материалы / под ред. к.пол.н. Т.С. Богдасаровой, д.пед.н. С.А. Писаревой, д.пед.н. Т.В. Светенко, Е. Vercammen. – М.: Фонд «Новая Евразия», 2009. – 384 с., ил.
11. Бажанов Н.Н. Автономное учреждение vs. университетской автономии // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Инновационное развитие системы образования в Российской Федерации». Москва, 11 февраля 2011 г.
12. Бажанов Н.Н. Методологические последствия цифровой трансформации высшего образования: соотношение между теорией и практикой в математическом образовании инженеров/Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: Материалы VII Междунар. науч. конф. Красноярск, 19–22 сентября 2023 г. / под общ. ред. М.В. Носкова. – Красноярск: Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева, 2023. – 1450 с. – С. 692-696.

Научное издание

СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА

Сборник научных трудов

XII Всероссийской
научной конференции

Подписано в печать 25.12.2024 г.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Формат 60×84 1/8.

Усл. печ. лист. 52,1. Уч. изд. л. 39,7. Тираж 100 экз (1-й завод 30 экз.). Заказ № 9828 от 28.12.2024 г.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции

Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.