



СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
Российской Академии Наук



X Всероссийская научная конференция

«СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА»

Сборник научных работ

2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Южный федеральный университет
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук
Северо-Кавказский федеральный университет
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)

**X Всероссийская
научная конференция**

«СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА»

Сборник научных работ

28 сентября – 02 октября 2021 г.
пос. Нижний Архыз

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2021

УДК 681.51.033(06)

ББК 32.965

С34

С34 X Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов (п. Нижний Архыз, Россия 28 сентября – 02 октября 2021 г.); Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2021. – 362 с.

ISBN 978-5-9275-3879-9

В сборник включены доклады, представленные в рамках X-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2021). Основными направлениями работы конференции являются: проблемы самоорганизации и управления в сложных технических системах; обработка информации и управление; информационная безопасность; интеллектуальные информационно-управляющие системы; управление системами с распределенными параметрами; проблемы математического моделирования сложных систем; 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.

ISBN 978-5-9275-3879-9

УДК 681.51.033(06)

ББК32.965

© Южный федеральный университет, 2021

**Организационный комитет X 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:

Аракелов А.В., Адыгейский государственный университет;

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;

Раппопорт Э.Я., Самарский государственный технический университет.

**Программный комитет X 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;

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;

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

Лукьянов А.Д., Донской государственный технический университет;

Мещеряков Р.В., Институт проблем управления РАН;

Обухов П.С., Донской государственный технический университет;

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

Попов А.Н., Южный федеральный университет;

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

Целых А.А., Южный федеральный университет;

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

Власюк В.В.

55 лет Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук: наши инструменты.....	8
---	---

Секция I. ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А.

Синергетический подход в теории управления: истоки, развитие, результаты	12
--	----

Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е.

Синергетическая концепция при управлении процессами обработки на металлорежущих станках	19
---	----

Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Сирота Д.Д., Першин И.М.

Моделирование взаимного влияния скважин и наземного оборудования на процесс неустановившейся фильтрации газа	25
--	----

Попов А.Н.

Синергетический синтез энергосберегающего регулятора для систем векторного управления синхронными двигателями с постоянными магнитами	30
---	----

Кузьменко А.А.

Синхронизация хаотических систем Арнеодо: сравнение синергетического закона скользящего управления с классическим	35
---	----

Веселов Г.Е., Ингабире А.

Комбинированный метод синергетического синтеза законов управления пространственным движением БПЛА с жестким крылом в условиях ветровых возмущений	42
---	----

Мушенко А.С., Золкин А.Д.

Анализ хаотического сигнала в канале связи с введением полезной информацией методом параметрической модуляции	51
---	----

Синицын А.С.

Синтез нелинейной системы управления активной подвеской автомобиля с компромиссным учетом кинематических ограничений.....	56
---	----

Олейников К.А.

Синергетическое управление синхронным двигателем электромобиля с динамически меняющимися дорожными условиями	62
--	----

Обухова Е.Н.

Синтез нелинейных адаптивных законов управления пневмоприводом при неконтролируемых возмущениях.....	68
--	----

Веремеюк А.И., Шпаковская И.И., Душин С.Е.

Задача построения динамической модели потребления кислорода человеком.....	74
--	----

Куповых Г.В., Клово А.Г.

Некоторые математические вопросы для задач оптимального управления	79
--	----

Помеляйко И.С.

Системный анализ зоны гипергенеза природно-технических систем ряда городов РФ	85
---	----

Секция II. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Подоплёкин Ю.Ф., Соловьева В.В., Толмачев С.Г., Шаров С.Н.

Интеллектуальные информационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов	91
---	----

Витковский В.В., Горохов В.А., Марухно А.С., Комаринский С.Л., Величко А.М.

Big Data vs Big Systems	99
-------------------------------	----

Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.

Управление формированием и поддержанием строя автономных беспилотных летательных аппаратов	104
--	-----

Шаров С.Н., Толмачев С.Г., Соловьева В.В.

Синтез динамической модели шума сигналов управления беспилотного летательного аппарата в режиме сопровождения заданного объекта.....	109
--	-----

Sharma Ashutosh, Tselykh Alexey

Software Effort Estimation of Web Applications Using Fuzzy Cognitive Mapping.....	112
---	-----

Елькин Д.М., Вяткин В.В.

Разработка распределённой системы для управления транспортом в рамках стандарта МЭК 61499	118
---	-----

Битюцкая Н.И., Битюцкий А.О.

Распознавание и классификация жестов знакового языка глухонемых людей с использованием нейросетевых технологий.....	124
---	-----

Самойлов А.Н., Костюк А.И.

Специализированные алгоритмы интеллектуального анализа и развертывания БД системы охраны периметра	130
--	-----

Nemury Silega Martínez

An overview of existing approaches to representing a dynamic intellectual environment in the form of a methodological context	136
---	-----

Гушанский С.М., Потапов В.С., Коробейникова Н.М., Горбунов А.В.

Разработка и исследование квантовых глубоких нейронных сетей для решения задач различных классов сложности.....	142
---	-----

Ромашин Д.В.

Разработка интеллектуальной системы «Независимый умный помощник»	148
--	-----

Сидельников В.И., Чагаев А.В.

Цифровая трансформация как эволюционный шаг развития автоматизации технологических процессов	151
--	-----

Коробейников А.Г., Мунтян Е.Р., Заколдаев Д.А., Грищенцев А.Ю.

Применение MATLAB для проектирования двухуровневой системы управления двигателем постоянного тока	155
---	-----

Секция III. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Абрамов Е.С., Туманов Д.А., Токарев М.В., Хабаров О.П.

Методика классификации открытых источников данных о киберугрозах по отраслям промышленности	158
---	-----

Максимова Е.А., Барабанов В.В., Садовникова Н.П.

Оценка инфраструктурных рисков деструктивного характера на объекте критической информационной инфраструктуры	164
--	-----

Басан Е.С., Басан А.С., Некрасов А.В., Пескова О.Ю., Шулика М.Г.	
База знаний об атаках на беспилотные летательные аппараты	170
Мудрук Н.Н., Трегубенко М.Д., Басан Е.С., Абрамов Е.С.	
Оценка методов искусственного интеллекта для детектирования дронов на основе радиочастотной активности	179

Секция IV. ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Воропаева Л.В.	
Краевая задача для непрерывно-неоднородного сферического слоя	186
Куповых Г.В., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Тимошенко Д.В.	
Электродинамические модели приземного слоя атмосферы	190
Буренко А.А., Поленов М.Ю., Пуховский В.Н.	
Повторное использование моделей при моделировании систем	195
Щербаков М.И.	
Динамика конечности паукообразного робота	201

Секция V. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Власюк В.В., Панчук А.В.	
Астроклиматические и технические ограничения спектроскопии звёзд на БТА	206
Витковский В.В., Горохов В.А., Желенкова О.П.	
Цифровизация - осознанная необходимость или неосознанная неизбежность?	210
Ардиланов В.И., Мурzin В.А., Афанасьева И.В., Иващенко Н.Г., Притыченко М.А., Васюк И.В.	
Реализация способов управления и обработки данных в фотоприемных устройствах на основе КМОП-матриц научного класса	216
Ляпсина Н.В., Бескин Г.М., Бирюков А.В., Иванов Е.А., Карпов С.В., Каткова Е.В., Перков А.В., Сасюк В.В.	
Поиск и исследование быстрых оптических транзиентов в широкоугольном мониторинге неба	223
Самойлов А.Н., Чумичёв В.С., Гайдуков А.Б.	
Применение мобильно-облачных систем для бесконтактного измерения геометрических параметров промышленной продукции и сырья	231
Ermakov Roman V., Nikiforov Alexander A., Balaban Oleg M., L'vov Alexey A., Seranova Anna A., Svetlov Mikhail S.	
A method for determining the frequency of a helicopter main rotor	237
Депутатова Е.А., Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Нахов С.Ф., Николаенко А.Ю., Скоробогатов В.В.	
Блок измерителей линейного ускорения с цифровым управлением и новыми функциональными возможностями для российских транспортных кораблей МКС	242
Гушанский С.М., Козловская М.А., Познина Н.А.	
Оцифровка и коррекция квантовых ошибок	249
Дробынин М.Е., Никифоров А.А., Львов П.А., Львов А.А., Светлов М.С., Филина Е.А.	
Модель кремниевого пьезорезистивного датчика давления	253
Цимбал В.А., Попов М.Ю., Калач П.К., Попов Р.В., Киреев Д.А.	
Порядок использования индивидуального и зондирующего вызова в системе радиосвязи второго поколения стандарта mil-std-188-141b для последующего измерения качества принятого ALE сигнала	260

Демченко В.В., Обухов П.С., Ивлиев Е.А.	
Особенности применения интерфейсов в smart- теплицах.....	268
Алалван Амин Раад Джихад, Львов П.А., Светлов М.С., Львов А.А., Мищенко Д.А., Никифоров А.А.	
Проблемы обеспечения надежности беспроводных сетей датчиков.....	273
Пантелей П.А.	
Предсказание погрешности триангуляции.....	281

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

Боев И.В., Боев О.И.	
Сингулярность – вероятностное управление личностной трансформацией.....	285
Лызь Н.А., Лызь А.Е.	
Моделирование и управление деятельностью студентов в интернет-пространстве.....	291
Ермаков А.С.	
Региональные вопросы обеспечения образовательного процесса по информационной безопасности в контексте реформирования нормативно-правовой базы.....	298
Крылова Е.Л., Немудрук М.Л., Федоров М.С., Новожилов И.М., Щуров Д.А.	
Использование технологии OPC UA при исследовании компьютерных моделей объектов управления в образовательном процессе	306
Эксакусто Т.В.	
Возможности образовательных технологий в перспективе развития саморегуляции студентов	311
Опрышко А.А., Волошин А.В.	
Проблемное и проектное обучение: сравнительный анализ	318
Плёнкин А.П. Ищукова Е.А., Федотова А.Ю., Компаниец В.С., Самойленко В.С.	
Опыт внедрения проектной деятельности	324

Секция VII. УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Першин И.М., Малков А.В., Цаплева В.В., Помеляйко И.С.	
Проектирование распределенной системы управления кустом скважин	330
Абрамкин С.Е., Душин С.Е.	
Исследование установки производства водорода как объекта управления	337
Дилигенская А.Н., Самокиш А.В.	
Прикладные аспекты минимаксной оптимизации в обратных задачах технологической теплофизики	342
Зайцев С.В.	
Реализация регулятора двух мерного распределенного объекта	348
Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Майрансаев З.Р.	
Единый секторный критерий устойчивости распределенных систем	351
Першин И.М., Малков А.В., Русак С.Н., Носова В.А.	
Влияние расположения скважин на суммарный дебит	356
Першин И.М., Санкин А.В.	
Стенд для исследования распределенной системы передачи и приема информации в радиодиапазоне	359

55 лет Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук: наши инструменты

Власюк Валерий Валентинович

Специальная астрофизическая обсерватория

Российской академии наук

п. Нижний Архыз

vvlas@sao.ru

Аннотация. В статье представлены важнейшие результаты, достигнутые САО РАН за последние 5 лет, в том числе и в работе крупнейших астрономических телескопов страны – 6-м оптического телескопа БТА и радиотелескопа РАТАН-600 с 600-м апертурой. Среди них - работы по установке обновленного 6-м зеркала на БТА, обновление парка крупноформатных светоприемников, создание спектрографа высокого разрешения для БТА, ввод в строй нового радиометрического комплекса и проведение анткоррозийных работ на РАТАН-600.

Annotation. The main achievements of SAO RAS, including activity at largest astronomical telescopes of Russia – optical 6-meter telescope BTA and 600-meter radiotelescope RATAN-600 – within last 5 years are presented. Between them – installation of renewed 6-m main mirror for BTA, updating of large-format detectors park and creation of high-resolution spectrograph for BTA, new radiometric complex and anti-corrosion procedures at RATAN-600.

Ключевые слова: наземная астрономия, научное приборостроение, уникальные научные установки.

Keywords: ground-based astronomy, scientific instrumentation, unique scientific installations.

I. ВВЕДЕНИЕ

В текущем 2021 году наша обсерватория отмечает свое 55-летие. Практически одновременно мы отмечаем и 45 лет с начала работы наших уникальных инструментов – Большого телескопа азимутального (БТА) с 6-метровым главным зеркалом и радиотелескопа РАТАН-600, остающихся и поныне крупнейшими астрономическими установками России.

30 декабря 1975 года государственной межведомственной комиссией был подписан акт о начале эксплуатации БТА, а чуть раньше – летом 1974 года на одном из секторов РАТАН-600 были проведены первые наблюдения.

Основные исторические вехи в жизни обсерватории до 2016 года достаточно полно были освещены в статьях Ю.Ю.Балеги и автора в сборниках «Специальная астрофизическая обсерватория 40 лет», и «Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук 50 лет», опубликованных в 2006 и 2016 годах, соответственно.

Последнее десятилетие, как никакое другое, было богато на структурные и организационные реформы, которые не могли не отразиться и на жизни обсерватории. Среди

них нельзя не упомянуть многолетнюю реформу российской науки, проводимую сначала в рамках Российской академии наук, а со второй половины 2013 года – вне ее. Российская академия наук, в составе которой мы находились с момента ее организации в 1991 году, перестала быть нашим учредителем, оставив след только в нашем наименовании. С 2014 года САО РАН подведомственна Федеральному агентству научных организаций (ФАНО России), а с 2018 года – Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, правда, сохранив при этом научно-методическое руководство со стороны Российской академии наук.

Следует отметить, что при этом нам удалось избежать серьезных кадровых сокращений, которыми сопровождалась реформа российской науки: штатная численность в 447 человек в 2006 году у нас осталась практически неизменной и через 15 лет, правда, с учетом внебюджетных ставок. Из них почти 120 человек составляют научные работники.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЗА 2016–2020 ГГ.

За прошедшие 5 лет нами было организовано и проведено 22 крупных конференции с участием около 800 человек. Важнейшими из них являются специализированные крупные астрофизические мероприятия: «Физика звезд: от коллапса до коллапса» (2016 г.), «Физика магнитных звезд» (2018 г.), «Diversity of the Local Universe», «Современная звездная астрономия» (2019 г.), «Наземная астрономия в России. XXI век» (2020 г.).

Следует отметить, что уже регулярной стала практика проведения конференций из серии «Системный синтез и прикладная синергетика», проведенных учеными Южного и Северо-Кавказского федеральных университетов с нашим участием и на нашей территории в 2017 и 2019 гг., сейчас мы очередную школу из этого цикла.

В рамках работы с молодежью нами проведено 5 школ для старшеклассников (совместно с Фондом «Траектория»), 4 раза – Дни открытых дверей, посвященных Дню космонавтики. В их проведении был перерыв в 2020 г., с 2021 г. – эта практика нами восстанавливается.

Хотелось бы отметить, что по итогам 2017 года САО РАН была отмечена международным агентством Clarivate Analytics, как самый цитируемый научно-исследовательский институт в стране в области наук о космосе. Самыми высокоцитируемыми учеными страны в 2017 году стали наши доктора наук И.Д. Каракенцев и Д.И.Макаров, а в 2018 году наш ученый О.В. Верходанов стал победителем конкурса «Лучшие обзоры журнала «Успехи физических наук».

Продолжал работу наш диссертационный совет по защитам по специальности «Астрофизика и звездная астрономия», в котором за истекшее 5-летие были защищены 9 кандидатских и 2 докторских диссертации. Наши сотрудники защищались и в диссертационных советах других организаций.

В 2016–2021 гг. работа наших уникальных телескопов планировалась новым органом, созданным под эгидой ФАНО России – Национальным программным комитетом по тематике российских телескопов. В нем под руководством директора ГАИШ МГУ К.А. Постнова работают ведущие специалисты в области наблюдательной астрономии из основных научных организаций России.

Основными направлениями научной деятельности САО РАН являются:

- исследование звезд;
- исследование галактик и других внегалактических объектов;
- исследование фоновых излучений Вселенной;
- исследование межзвездной среды;
- исследование Солнца и объектов солнечной системы;
- исследование объектов в околоземном пространстве;
- модернизация телескопов Обсерватории;
- информационное обеспечение исследований;
- разработка и создание приборов и методов наблюдений.

Успешное выполнение планов научно-исследовательских работ сотрудниками САО РАН нашло свое отражение и в достижениях, отмеченных Научным советом по астрономии и Российской академией наук. Среди них только за 2020 год можно отметить работы по внутренней структуре активных ядер галактик, проводившиеся под руководством д.ф.-м.н. В.Л. Афанасьева (к нашему прискорбию, скончавшегося в декабре 2020 г.), обнаружение связи происхождения высокоэнергичных нейтрино с радиояркими блазарами по данным многолетнего мониторинга на РАТАН-600, создание крупноформатных скоростных приемников оптического излучения на базе КМОП-матриц.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

A. Замена главного зеркала бта

Среди инструментальных работ выделяется наша деятельность по замене Главного зеркала БТА N1 (оно использовалось на телескопе до 1979 года), проводив-

шаяся в 2018–2019 гг. Работы, начатые в САО РАН и ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла» еще в 2005 году, включали в себя:

- модернизацию фрезерного и полировального станков на предприятии;
- реконструкцию системы кондиционирования оптического цеха;
- разработку и изготовление корректора волнового фронта и оснастки для контроля рабочей поверхности;
- проведение расчета деформаций поверхности ГЗ;
- доводку рабочей поверхности полированием до СКО волнового фронта не более 0.3λ ($\lambda=632,8$ нм) с шероховатостью не более 3 нм;
- устранение располировок в местах вклеек и завалов по краям зеркала;
- разработку и изготовление грузозахватывающего устройства и транспортировочного контейнера;
- ремонт козлового крана К5-100;
- создание датчика волнового фронта Шака-Гартмана, разработку методика контроля поверхности главного зеркала на телескопе.

В мае-декабре 2018 года после доставки в САО РАН обновленного зеркала под общим руководством заместителя директора по научной работе к.ф.-м.н Д.О. Кудрявцева были выполнены:

- переустановка зеркал (N1 вместо N2);
- попытки исправить форму регулировкой разгрузок;
- алюминирование рабочей поверхности, подготовка к запуску в наблюдения на зимний период 2018–2019 г.

В 2019 году с января по май проводились наблюдения в ограниченном режиме обновленном зеркале, по итогам которых было принято решение о возвращении после переалюминирования ранее работавшего зеркала N2. Эти работы и были завершены к концу сентября 2019 года. Сейчас новой администрации предстоит решить вопрос о продолжении работ по восстановлению рабочей поверхности этого зеркала.

B. Обновление парка светоприемников

Среди важных результатов истекшего 5-летия можно отметить существенное обновление парка светоприемных систем на телескопе БТА. Лабораторией перспективных разработок (под руководством к.ф.-м.н. И.В. Афанасьевой) были введены в строй системы на базе приборов:

- E2V CCD 42-90 формата 2048×4612 элементов на спектрографе НЭС (2019 г.);
- E2V CCD 231-84 формата 4128×4112 элементов на оптоволоконном спектрографе, который вводится в строй (2020 г.) (показана на рис. 1),
- E2V CCD 261-84, формата 2080×4112 элементов на фокальном редукторе SCORPIO-2 (2021 год).

Также САО РАН были приобретены крупноформатные системы производства фирмы Andor для оснащения спектр-интерферометра и эшелле-спектрографа первично-го фокуса БТА.

Как упоминалось выше, создаваемая линейка крупноформатных приборов на базе КМОП-матриц позволит продолжить обновление парка детекторов на БТА и других оптических телескопах САО РАН.

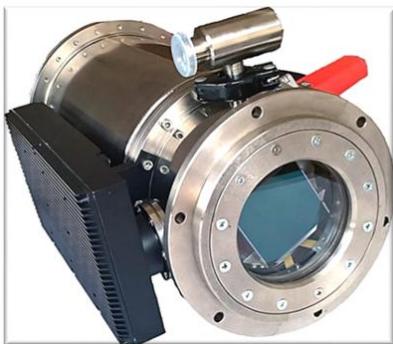


Рис. 1. Общий вид новейшей крупноформатной системы регистрации изображений для оптоволоконного спектрографа БТА

C. Создание спектрографа с оптоволоконным входом

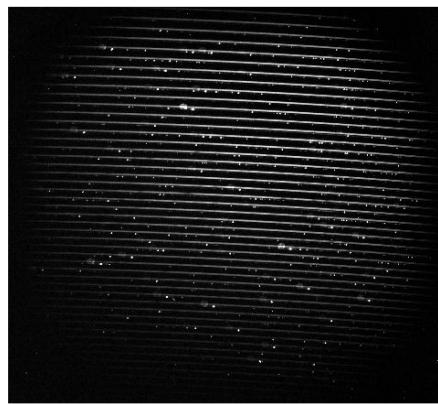
Средства Российского научного фонда позволили нам в 2015–2019 гг. реализовать проект уникального спектрографа высокого разрешения с оптоволоконным входом, который был оснащен вышеупомянутой системой.

Эта сложная многолетняя работа проводилась в тесной кооперации с ведущими предприятиями отечественной оптико-механической промышленности под руководством к.ф.-м.н. Г.Г. Валявина, избранного коллективом обсерватории в декабре 2020 г. на пост директора.

Основной задачей созданного прибора станет получение высокоточных измерений лучевых скоростей звезд, прежде всего в задачах поиска и классификации экзопланет – планет в других звездных системах.

В режиме тестирования позиционной стабильности спектрографа в 2019–2021 гг. уже проведены наблюдения звезд в диапазоне звездных величин $2^m - 10^m$.3 с экзопланетами. Авторами прибора подтверждена высокая пропускающая способность прибора на уровне лучших мировых образцов.

Контроль механического дрейфа спектрографа выполняется с использованием спектра сравнения от торий-аргоновой лампы с полым катодом. Он осуществляется с точностью 1 м/сек, при этом позиционная стабильность спектров звезд – около 10 м/сек. До конца 2021-го года эта цифра будет улучшена за счет дополнительной стабилизации узла оптоволоконного тракта и использования интерферометра Фабри-Перо. Ожидаемая точность измерений лучевых скоростей ярких звезд в этом режиме составляет 1 м/с. Одно из первых спектральных накоплений приведено на рис. 2.



*Рис. 2. Изображение эшелле-спектра звезды HD93148
8.3 зв.вел., экспозиция 6 мин, разрешение R = 50000,
отношение сигнала к шуму в пике ~ 80*

D. Работы на радиотелескопе РАТАН-600

Среди работ, проведенных на РАТАН-600, можно отметить введение в строй нового комплекса радиометров для исследования быстрых радиосплексов диапазона 5.7 ГГц на Западном секторе. Авторы – коллектив лаборатории радиометров под руководством Н.А. Нижельского. Он предназначен для измерений интенсивности радиоизлучения точечных и протяженных радиоисточников на миллисекундных временах. С сентября 2017 года на нем ведутся исследования. Общий вид радиометра приведен на рис. 3. Нами планируется расширение возможностей этого комплекса за счет средств развития приборной базы науки в рамках нацпроекта «Наука».

Также следует отметить важные работы, проводимые на РАТАН-600 сотрудниками службы эксплуатации под руководством А.Х. Боташева по анткоррозийной защите элементов телескопа. Они были начаты в 2017 году и до конца 2020 г. из общей площади металлоконструкций радиотелескопа, составляющей 110 000 кв.м., защищено около 43 000 кв.м. Набранный темп работ дает основание надеяться на их завершение в ближайшие 2–3 года.



*Рис. 3. Общий вид радиометрического комплекса 5.7 ГГц
в лаборатории*

Реализация нацпроекта «Наука» в части обновления приборной базы научных организаций в 2019–2020 гг. позволила нам начать в текущем году работы по полной замене электроприводного оборудования и системы управления Плоского отражателя РАТАН-600. Надеюсь, что уже в этом году мы увидим Плоский отражатель РАТАН-600 принципиально нового уровня. Работы ве-

дутся коллективом ученых и инженеров под общим руководством и.о. заместителя директора по научной работе, к.ф-м.н. Ю.В. Сотниковой

IV. НАШИ ВАЖНЕЙШИЕ ЗАДАЧИ НА БЛИЖАЙШИЕ ГОДЫ

Среди задач в области развития нашей наблюдательной базы хотелось бы выделить следующие:

- продвижение проекта национального обзорного оптического телескопа 4-м класса;
- участие САО в развитии инструментальных средств миллиметровой астрономии с установкой одной из антенн у нас;

- создание линейки современных крупноформатных приемников излучения.

Конечно, реальных задач, стоящих перед нашим коллективом, намного больше. И в будущем всем нам предстоит вместе решить еще не одну научную и инженерно-техническую проблему, которые перед нами ставит жизнь. От слаженной работы наших ученых, инженеров, техников и рабочих напрямую будут зависеть и состояние наших объектов, и научные результаты, как нашей обсерватории, так и российской астрономии в целом.

Секция I

ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

DOI: 10.18522/syssyn-2021-2

Синергетический подход в теории управления: истоки, развитие, результаты

Веселов Геннадий Евгеньевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
gev@sedu.ru

Попов Андрей Николаевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
apropov@sedu.ru

Кузьменко Андрей Александрович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
aakuzmenko@sedu.ru

Аннотация. В докладе представлено текущее состояние исследований в области синергетического управления; изложены основные этапы становления и развития синергетической теории управления; представлены основные результаты ее применения для решения прикладных задач управления объектами и системами.

Annotation. The report presents the current state of research on synergistic control; the main stages of the formation and development of the synergistic control theory are outlined; the main results of its application for solving applied problems of objects and systems control are presented.

Ключевые слова: нелинейные системы, синтез регулятора, синергетическое управление, аналитическое конструирование агрегированных регуляторов.

Keywords: nonlinear systems, regulator synthesis, synergistic control, analytical design of aggregated regulators.

I. ВВЕДЕНИЕ

В начале 1990х годов профессором Анатолием Аркадьевичем Колесниковым предложен синергетический подход в теории управления, использующий понятия и методы нелинейной динамики и синергетики и, в первую очередь, направленный на решение фундаментальной проблемы синтеза регуляторов для управления нелинейными многосвязными и многомерными динамическими объектами и системами.

Ниже представлены результаты анализа публикационной активности российских и зарубежных ученых в области синергетического управления в наиболее крупных библиометрических системах – Scopus, Web of Science, eLibrary.ru (РИНЦ). Поиск публикаций осуществлялся по запросу «синергетическое управление» или «синергетический подход к управлению» в названии

публикации или ключевых словах. При анализе мы рассматривали публикации всех типов, за все годы, представленные в соответствующей системе.

В Scopus по запросу выводится 373 публикации за период с 1989 г. по настоящее время, из которых 52% это статьи в журналах, 45% доклады на конференциях и 3 книги (главы в книгах) на английском языке. При этом, как видно из рис. 1, количество публикаций ежегодно увеличивается.

Распределение публикаций по областям знаний показано на рис. 2. Более всего публикаций представлено в области инженерных наук (Engineering), автоматики, информатики и кибернетики (Computer Sciences) и энергетики (Energy).

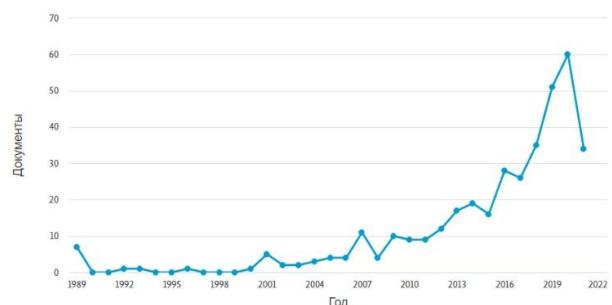


Рис. 1. Распределение публикаций по годам в Scopus

В Scopus и Web of Science наиболее часто встречаются публикации, в которых объектом управления выступает DC/DC конвертор, электропривод постоянного или переменного тока, объект энергосистемы (синхронный генератор, ветрогенератор и др.), подвижный объект (электромобиль, мобильный робот, летательный аппарат

различной компоновки и др.). Однако встречаются и достаточно экзотические объекты: химические реакции, инфекции (ВИЧ и др.), экологические процессы.

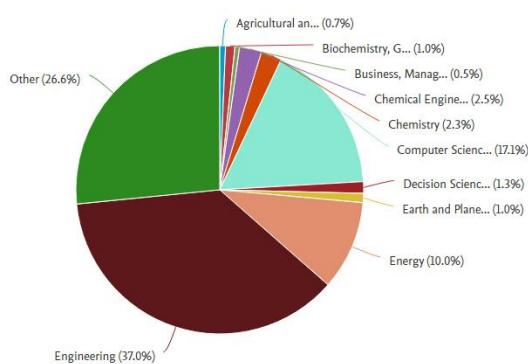


Рис. 2. Распределение публикаций по областям знаний в Scopus

Работы по синергетическому управлению в Scopus представлены авторами из 46 стран, а наиболее представлены авторы из Китая, России, Алжира, США – см. рис. 3. Авторы этих публикаций аффилированы с 161 организацией – рис. 4.

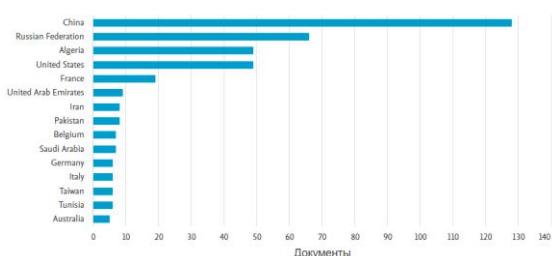


Рис. 3. Распределение публикаций по странам в Scopus

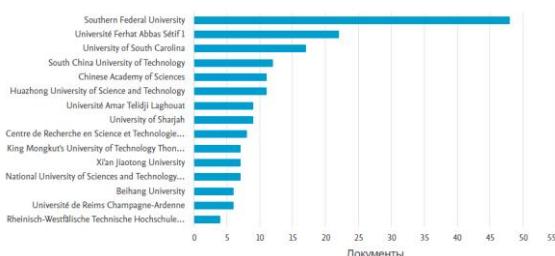


Рис. 4. Распределение публикаций по организациям в Scopus

В Web of Science по запросу выводится 284 публикации за период с 1989 г. по настоящее время, из которых 59% это статьи в журналах, 39% доклады на конференциях. Распределения публикаций по годам и областям знаний практически такие же как в Scopus. А в распределении публикаций по странам (50 стран) и организациям (354 организации) имеются отличия – рис. 5, 6.

В eLibrary.ru (РИНЦ) по запросу выводится 1588 публикаций за период с 1992 по 2021 гг. Из этих публикаций самая цитируемая – это монография 1994 г. «Синергетическая теория управления», имеющая 620 цитирований. К сожалению, система РИНЦ не позволяет провести анализ результатов поиска по различным аспектам публикационной активности, как Scopus и Web of Science.

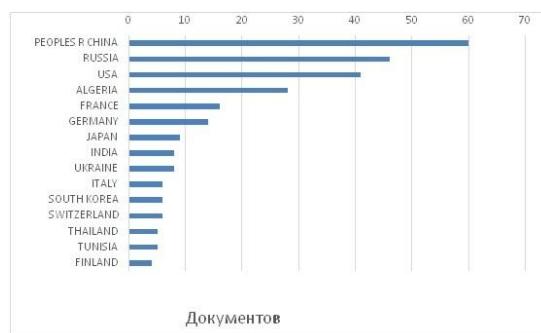


Рис. 5. Распределение публикаций по странам в Web of Science

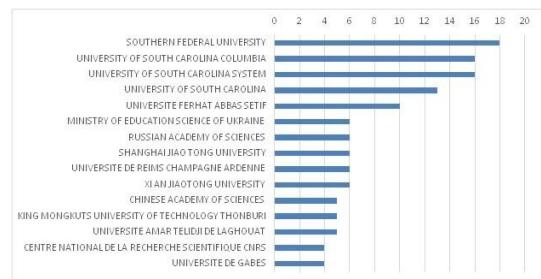


Рис. 6. Распределение публикаций по организациям в Web of Science

Таким образом, в настоящее время синергетический подход оформился в отдельное направление современной теории автоматического управления, получившее признание в России и за рубежом, методы синергетической теории управления (СТУ) широко используются исследователями различных стран для решения различных прикладных задач синтеза автоматических регуляторов. Настоящий доклад с одной стороны представляет собой небольшой исторический экскурс, позволяющий понять, как происходило становление и развитие синергетического подхода в теории управления. На наш взгляд, весьма интересно посмотреть в ретроспективе эволюцию идей, трансформацию методологических подходов и базовых понятий, составляющих основу СТУ. Здесь уместно вспомнить Анри Пуанкаре: «...история науки должна быть нашим первым руководителем. Лучший метод для предвидения будущего развития математических наук заключается в изучении истории и нынешнего состояния этих наук».

С другой стороны, любая теория обретает свою значимость только при ее использовании при решении практических задач. Поэтому в докладе кратко представлены наиболее значимые результаты применения СТУ для решения прикладных задач управления сложными нелинейными объектами и системами, полученные научной школой профессора А.А. Колесникова.

II. МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ АГРЕГИРОВАННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Методологическим ядром СТУ и основой для ее формирования, вне всякого сомнения, является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), разработанный профессором Колесниковым А.А. в 80-х годах прошлого столетия.

Название метода, предложенное автором, по всей видимости, отражает его многолетний научный опыт решения задач синтеза оптимальных регуляторов и созвучно с известным методом АКОР (аналитического конструирования оптимальных регуляторов) А.М. Летова.

Следует отметить, что профессор А.А. Колесников являлся известным ученым в области синтеза оптимальных систем управления. Практически все его публикации до середины 1980-х, а также кандидатская и докторская диссертации, посвящены задачам оптимального управления. Вполне возможно, что идея динамической декомпозиции управляемых систем на инвариантных многообразиях, возникла у него при анализе поведения систем, оптимальных по быстродействию, в которых движение по линии (поверхности) переключения также происходит в пространствах меньшей геометрической размерности.

После создания метода АКАР, профессор Колесников практически не занимался задачами оптимального управления в классической постановке, а в дальнейшем не раз подвергал оптимизационный подход в теории управления серьезной критике. Свое разочарование он объяснял чрезмерной математизацией задач оптимального управления и методологической ограниченностью теории оптимального управления для класса нелинейных, многомерных и многосвязных систем.

По словам Анатолия Аркадьевича, идея метода АКАР у него возникла в конце 70-х, а в его докторской диссертации 1980 г., посвященной многокритериальному синтезу оптимальных регуляторов, есть соответствующий небольшой раздел.

Первая статья по методу АКАР – «Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных систем, асимптотически устойчивых в целом» вышла в региональном сборнике научных статей «Синтез алгоритмов сложных систем» в 1984 г. [1]. В 1987 г. был опубликован цикл статей, посвященных аналитическому конструированию агрегированных регуляторов, в центральных журналах: «Известия вузов. Электромеханика», «Известия вузов. Энергетика» и «Известия вузов. Приборостроение» [2–5]. В том же году в издательстве «Энергоатомиздат» вышла первая монография, в которой были обобщены и кратко изложены основные положения нового метода [6].

В этой монографии введены такие ключевые понятия метода АКАР и СТУ в целом, как «агрегированная макропеременная», «инвариантное многообразие», «основное функциональное уравнение»; рассмотрена общая методология синтеза скалярных и векторных агрегированных регуляторов; представлены примеры практического синтеза нелинейных агрегированных систем.

Наибольший интерес с точки зрения дальнейшего развития метода АКАР, на наш взгляд, представляет собой третья глава книги – «Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных систем на основе совокупности притягивающих многообразий». Там фактически описан основной принцип СТУ – принцип расширения-сжатия фазового пространства управляемых систем и изложена идея поэтапной динамической декомпозиции систем на инвариантных многообразиях.

Однако, в общей постановке задачи, в теоретических выкладках, да и в самом названии книги чувствуется заметное влияние на взгляды автора доминирующего в то время оптимизационного подхода. Например, задача синтеза регулятора ставится как задача оптимального управления, основное функциональное уравнение называется уравнением устойчивой экстремали, теоретические выкладки опираются на методы классического вариационного исчисления и т.д.

При дальнейшем развитии метода указанное влияние будет фактически нивелировано, а возникшая на его основе СТУ будет иметь совершенно другой концептуальный базис. В этой связи, примечательна следующая цитата из предисловия к [6]: «Отличительной чертой метода является обеспечение помимо минимума некоторого функционала (что, вообще говоря, является второстепенной задачей) таких важнейших свойств синтезируемых нелинейных систем, как асимптотическая устойчивость в цепом или в некоторой области фазового пространства, заданные время и характер затухания переходных процессов, автономность и др. Оказывается, что эти свойства можно гарантировать на этапе синтеза без поиска решений нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движение объекта. Реализация указанной идеи, восходящей к идеям второго метода Ляпунова, была достигнута путем введения совокупности притягивающих многообразий понижающейся размерности, к которым асимптотически притягивается изображающая точка в процессе ее движения к началу координат фазового пространства».

III. СТАНОВЛЕНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

В 1980-х на русский язык были переведены и впервые опубликованы книги И. Приожина и Г. Хакена [7, 8], посвященные новым подходам к исследованию процессов самоорганизации в сложных нелинейных динамических системах различной природы. Такие новаторские направления как теория самоорганизации, синергетика и нелинейная динамика приобретают чрезвычайную популярность в научном сообществе.

Профессор А.А. Колесников, занимающийся проблемой синтеза нелинейных систем, обнаружил удивительные аналогии в процессах образования сложных диссипативных структур и процессах управления. Метод АКАР гармонично вписывался в эту новую парадигму. Параметры порядка Хакена и принцип подчинения синергетики были «созвучны» агрегированным макропеременным и идеи динамической декомпозиции метода АКАР, движение изображающей точки к инвариантному многообразию было аналогично движению к атрактору и т.д.

Это, наверное, и послужило причиной концептуального и терминологического переосмыслиния метода АКАР, отказа от принципов оптимального управления и понимания необходимости создания совершенного иного подхода к синтезу нелинейных систем управления, сочетающего в себе идеи синергетики и кибернетики.

«К синергетике как к науке, изучающей поведение нелинейных динамических систем вдали от положения равновесия при изменении некоторых управляющих параметров наиболее близка по своей идеологии прикладная теория управления. В этой связи представляется

весьма перспективным для развития современной теории управления осуществить попытку переноса основных свойств синергетических систем на конструируемые системы управления нелинейными техническими объектами», – отмечает А.А. Колесников в предисловии монографии [9], выпущенной в издательстве «Энергоатомиздат» в 1994 г. Эта монография, ставшая уже классической, содержит основные положения синергетического подхода в теории управления и считается его отправной точкой. В книге изложены концептуальные положения СТУ; впервые сформулирован базовый ее принцип – принцип расширения-сжатия фазового пространства управляемых систем; впервые говорится о динамической декомпозиции исходной системы на инвариантных многообразиях; метод АКАР излагается на основе иных, чем в монографии [6] концептуальных принципах, где оптимизирующий функционал либо вообще не рассматривается, либо играет вспомогательную роль (сопровождающий оптимизирующий функционал). Представлено применение метод АКАР для систем со специальными свойствами: дискретно-непрерывных, селективно-инвариантных, астатических, систем с разрывным управлением, систем с терминальным управлением. Здесь же впервые описана процедура синтеза наблюдателей, использующая идеи метода АКАР, которая впоследствии легла в основу метода синтеза динамических регулятора с асимптотическими наблюдателями.

В ноябре 1994 г. профессор А.А. Колесников представляет новую теорию на сессии РАН «Новые концепции общей теории управления». Инициатором этой сессии выступил академик РАН Александр Аркадьевич Красовский, указывающий на чрезмерную математизацию теории управления, называвший теорию управления – полигоном для неудавшихся математиков и призывающий к созданию т. н. физической теории управления, учитывающей свойства реальных объектов и систем, которая понятна инженерам, разрабатывающих системы автоматического управления [10].

Синергетический подход в теории управления получил одобрение и поддержку академика А.А. Красовского [11]: «Развиваемое А.А. Колесниковым направление следует признать выдающимся как по общности базовых концепций, так и по практической значимости... Оно, несомненно, является фундаментальным и может быть отнесено к категории базовых концепций, которые должны вывести науку об управлении на уровень упомянутых выше требований».

В ноябре 1995 г. в Таганроге на базе Таганрогского радиотехнического университета (ТРТУ) состоялась конференция РАН и Министерства образования РФ «Синергетика и проблемы управления», собравшая крупных ученых в области теории и систем управления России. Доклады, сделанные А.А. Колесниковым на этой конференции, вызвали неподдельный интерес и бурную дискуссию и фактически завершили этап становления СТУ как нового подхода в общей теории управления.

IV. РАЗВИТИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ОСНОВ И МЕТОДОВ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Становление СТУ совпало по времени с трудным этапом в истории нашей страны. Финансирование науки и образования сократилось до минимума. Зарплата пре-

подавателя вуза стала в разы меньше зарплаты рядового бухгалтера. Наблюдался существенный отток научно-технических кадров из отрасли и их иммиграция. Возникла серьезная угроза разрушения научных школ и утраты ведущих позиций во многих областях науки и техники.

В 1996 г. ТРТУ включается в консорциум зарубежных университетов для участия в крупном международном проекте Virtual Test Bed (VTB), направленном на создание программного обеспечения для моделирования процессов в крупных автономных энергосистемах. Профессор А.А. Колесников возглавляет раздел «Новые стратегии управления» и остается руководителем НИР по разработке алгоритмов управления на протяжении всего 10-летнего периода реализации проекта. Участие в проекте позволило ему на регулярной основе посещать США с научными докладами и читать лекции в американских университетах.

На наш взгляд, включение научной школы профессора А.А. Колесникова в проект VTB позволило не только преодолеть указанные трудности, сохранив кадровый потенциал в «лихие 90-е», и пройти серьезную международную апробацию методов СТУ, но и получить хорошую возможность применить их для решения прикладных задач управления различными техническими объектами и системами (энергетическими, электромеханическими, и электротехническими и др.).

В рамках проекта VTB разработаны прикладные методы синергетического синтеза для следующих классов технических объектов и систем:

- электрические приводы постоянного и переменного тока и основанные на них электромеханические системы;
- турбогенераторы и их группы;
- силовые преобразователи (Buck, Boost, Buck-Boost, Сuk и SEPIC конвертеры) и базирующиеся на них энергосистем.

Особенностью разработанных методов являлось использование наиболее адекватных нелинейных моделей динамики и мобилизация всех предусмотренных конструкцией каналов управления (векторный принцип управления). В результате применения этих методов были синтезированы регуляторы для систем автоматического управления соответствующими техническими объектами и системами, превосходящие существующие аналоги с точки зрения области устойчивости, энергоэффективности и адаптивности.

Участие научной школы в проекте VTB стало первым опытом выстраивания международных исследовательских коллaborаций. В результате такого сотрудничества появились совместные публикации с зарубежными исследователями [11–14], послужившие более широкому внедрению теории и методов СТУ в международную научную среду. В дальнейшем многие из участников этих коллaborаций начали развивать собственные направления исследования с использованием СТУ.

Аспиранты профессора А.А. Колесникова, которые являлись основными исполнителями этого проекта, составили костяк формирующейся научной школы «Синергетика и проблемы теории управления». В 1997–98 гг. были защищены первые кандидатские диссертации по методу АКАР и СТУ.

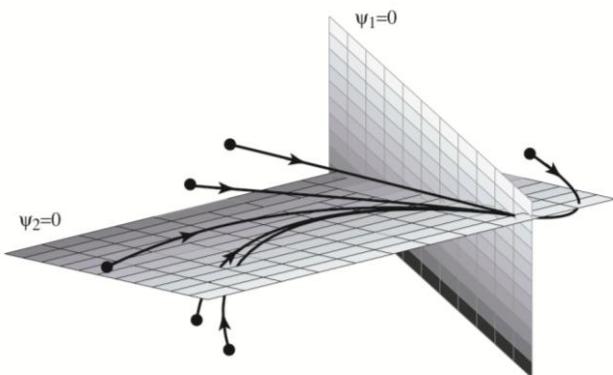


Рис. 7. Иллюстрация движения фазовых траекторий к пересечению инвариантных многообразий

В 1997 г. научный коллектив выиграл грант по ФЦП «Государственная поддержка высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 гг.» на издание трехтомной монографии «Современная прикладная теория управления». Эта монография, авторами которой стали ученые РАН, ТРТУ, СПбГЭТУ (ЛЭТИ), Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского и Донского государственного технического университета вышла в печать в 2000 г. [15–17].

Во втором томе монографии [16] изложены теоретические положения СТУ. По сравнению с монографией [9] метод синтеза динамических регуляторов с наблюдателями состояния (Н.В. Балалаев), ставший в дальнейшем одним из методов синергетического синтеза адаптивных регуляторов, описан более подробно и formalизован. Метод синергетического синтеза нелинейных дискретных регуляторов (Г.Е. Веселов) представлен в виде отдельной главы. Впервые рассмотрено применение метода АКАР для решения задач управления системами с хаотической динамикой. Здесь же А.А. Колесников вводит понятие «направленная самоорганизация», подчеркивая отличие управляемых систем от систем, которые описывает синергетика и в которых самоорганизация носит спонтанный характер.

Третий том монографии «Новые классы регуляторов технических систем» [17] в большей своей части посвящен изложению научных результатов по применению СТУ для решения прикладных задач управления техническими объектами и системами. Отдельные главы посвящены синергетическому синтезу регуляторов для систем управления электроприводами постоянного (А.Н. Попов) и переменного (Г.Е. Веселов) тока, турбогенераторами (А.А. Кузьменко). Здесь впервые предлагается формулировать цели управления технических систем не в виде первичных показателей качества, не совсем корректных в отношении нелинейных систем, и не в виде достаточно абстрактного оптимизирующего функционала, а в виде соответствующих инвариантов, отражающих

специфику управляемого объекта и требования к его функционированию. В отдельной главе представлены инварианты электромеханики, вибромеханики, химико-технологических процессов. В главе, посвященной разработке стратегий взаимосвязанного управления электромеханическими системами, представлены результаты по синтезу иерархических систем, ставшие в последствие основой докторской диссертации Г.Е. Веселова, и, в частности, в этой главе впервые к задаче управления пространственным движением мобильных роботов был применен синергетический подход (Б.В. Топчиев).

В это время уже появились пакеты компьютерной математики, позволяющие легко моделировать динамику управляемых систем и обладающих средствами 3D визуализации. Это позволило строить инвариантные многообразия в трехмерном пространстве, тем самым иллюстрировать базовое теоретическое положение метода АКАР о стягивании фазовых траекторий замкнутых систем к пересечению инвариантных многообразий (рис. 7).

В послесловии ко всему трехтомнику, которое называется «О научных стереотипах и синергетике», профессор А.А. Колесников дает оценку текущему состоянию развития синергетического подхода в теории управления, характеризует его восприятие в российском научном сообществе. Он с одной стороны призывает избегать стереотипов в оценке новых направлений, а с другой – предупреждает об опасности превращения их в моду [17]: «Что касается оправданной инвазии синергетики в современную науку, позволяющую, на наш взгляд, впервые в истории естествознания проложить некоторый мостик между естественниками и гуманитариями («физиками» и «лириками»), то, в целом, это – вполне положительное явление, однако здесь нужно, как всегда, помнить о мере и не впадать в крайности всеобщей «синергетизации».

В 2002 г. приказом ректора ТРТУ образована новая кафедра «Синергетика и процессы управления» (СиПУ), в первую очередь, ориентированная на подготовку магистров, кандидатов и докторов наук и выполнение НИР. Кафедру возглавил профессор А.А. Колесников, в ее состав вошли его ученики – молодые кандидаты наук и аспиранты. Сформировался молодой научный коллектив под руководством маститого ученого, способного решать серьезные научно-технические задачи (рис. 8). Приведем основные показатели, которые наглядно иллюстрируют деятельность кафедры за время ее существования:

- выполнено 6 хоздоговорных НИР общим объемом свыше 7 млн. руб.; среди заказчиков – ОАО «СОЦДУ ЕС» (г. Москва), ОАО «Севзапмонтажавтоматика» (г. В. Новгород), ПАО ТАНТК им. Г.М. Бериева (г. Таганрог);
- получено 29 грантов РФФИ, Минобрнауки РФ и Рособразования;
- защищено 24 кандидатских и 2 докторских диссертаций;
- опубликовано 23 монографии и более 800 других научных работ.



Рис. 8. Состав кафедры синергетики и процессов управления в год ее образования

Коллектив научной школы продолжает развивать концептуальные основы и методы СТУ. Методика синергетического синтеза астатических регуляторов, предполагающая включение интегрирующих звеньев в структуру закона управления, доработана и оформлена в виде метода синергетического синтеза с интегральной адаптацией на инвариантных многообразиях [18]. Предложена методика синтеза нелинейных осцилляторов, позволяющая получать законы управления для генерации в замкнутой системе режимов незатухающих регулярных или хаотических колебаний. [19]. Разработаны теория и методы синергетического синтеза иерархических систем управления [20]. Ведутся исследования по синтезу систем со скользящим управлением [21]. В [22] изложена методика синергетического синтеза следящих регуляторов.

Существенная доля исследований посвящена решению прикладных задач управления техническими объектами и системами. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза энергосберегающих регуляторов для систем векторного управления электроприводами постоянного и переменного тока [23]. Решена сложная нелинейная проблема координирующего управления турбогенераторами и их группами в экстремальных и аварийных режимах работы мощных энергосистем [24]. Развивается синерго-кибернетический подход к синтезу стратегии группового управления мобильными роботами [25], базирующийся на предложенных в работе [26] подход формирования в пространстве управляемых систем не только притягивающих инвариантных множеств – аттракторов, но и отталкивающих множеств – repellоров, положивший основу формирования «аттракторно-repellлерной» стратегии управления движением мобильных роботов в условиях неопределенности внешней среды (Б.В. Топчиев). Разработаны алгоритмы комплексной оптимизации тяги для систем автоворедения подвижного состава железнодорожного транспорта [27]. Решена важная проблема синтеза законов управления пространственным движением летательных аппаратов, обеспечивающих их текущую структурную адаптацию к режимам и условиям полета, что позволило создать методологическую и опытно-конструкторскую базу для проектирования нового поколения пилотажно-навигационных комплексов [28]. Результаты этих исследований нашли широкое применение при разработке перспективных

систем управления полетом самолетов-амфибий и гидросамолетов на Таганрогском авиационном научно-техническом комплексе имени Г.М. Бериева.

Основные результаты фундаментальных и прикладных исследований опубликованы издательством URSS в виде серии монографий «Синергетические методы управления сложными системами» [29–31]. Следует отметить, что книги этой серии пользуются спросом, а в 2019 г. эта серия была переиздана в третий раз.

В последние годы своей научной деятельности профессор А.А. Колесников активно работал над исследованием фундаментальной проблемы гравитационного взаимодействия. Им предложен системный закон гравитационного взаимодействия тел, структурно включающий в себя закон тяготения Ньютона, что позволило, помимо его общенаучной значимости, по-новому решить сложную прикладную проблему оптимального управления орбитальным движением космических летательных аппаратов с «малой тягой» [32].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Этот доклад мы посвятили памяти автора синергетического подхода в теории управления и нашего учителя Анатолия Аркадьевича Колесникова. Поэтому логично завершить его словами, прозвучавшими на его публичной лекции в 2007 г.: «Прикладная значимость науки о процессах управления особо возросла в начале XXI века. Сегодня, когда формируется постиндустриальное информационное «общество риска», кардинальной проблемой становится существенное увеличение удельного веса искусственных самоорганизующихся регуляторов в единой целостной системе «общество – техносфера – природа». Существенное отличие современных стратегий технологической деятельности состоит в освоении принципиально новых типов объектов и процессов, представляющих собой весьма сложные саморазвивающиеся макросистемы. В таких открытых макросистемах возникают, как известно, кооперативные явления, базирующиеся, в первую очередь, не на силовых, а на информационных взаимодействиях. Такого рода принципиально новые кооперативные явления в макросистемах следует непременно учитывать при разработке эффективных стратегий технологической деятельности человека, опирающихся на базовую идеологию единства процессов самоорганизации и управления».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников А.А. Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных систем, асимптотически устойчивых в целом // Синтез алгоритмов сложных систем. – Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1984. – Вып. 5.
2. Колесников А.А. Тесленко О.А. Аналитическое конструирование систем с разрывным управлением // Известия вузов. Приборостроение. – 1987. – Т. 30, № 12. – С. 11-16.
3. Колесников А.А. Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных регуляторов возбуждения синхронных генераторов энергосистем // Известия вузов. Энергетика. – 1987. – № 2.
4. Колесников А.А. Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных регуляторов по заданной совокупности инвариантных многообразий. 1. Скалярное управление // Известия вузов. Электромеханика. – 1987. – № 3. – С. 100-109.
5. Колесников А.А. Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных регуляторов по заданной совокупности инвариантных многообразий. 2. Векторное управление // Известия вузов. Электромеханика. – 1987. – № 3. – № 5. – С. 58-66.

6. Колесников А.А. Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.
7. Приожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой: пер. с англ. / под общ. ред. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича и Ю.В. Сачкова. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
8. Хакен Г. Синергетика. – М. : Мир, 1980. – 404 с.
9. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 334 с.
10. Новые концепции общей теории управления: Сборник научных трудов / под ред. А.А. Красовского. – М.; Таганрог: ТРТУ, 1995. – 183 с.
11. Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Kuzmenko A., Popov A., Dougal R., Kondratiev I. A Synergetic Approach to the Computer Modeling of Power Systems // Proc. of the 7th Workshop on Computers in Power Electronics. July 16-18, 2000 Blacksburg, Virginia. Proceeding. – P. 251-254.
12. Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Monti A., Ponci F., Santi E., Dougal R. Synergetic Synthesis of Dc-Dc Boost Converter Controllers: Theory and Experimental Analysis // Proc. of IEEE APEC 2002, Dallas, Texas, March 10-14, 2002. – P. 409-415.
13. Kondratiev I., Dougal R., Santi E., Veselov G. Synergetic control for DC-DC Buck Converters with Constant Power Load // Proc. of IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC'04 Achen, Germany 2004. – P. 3758-3764.
14. Kondratiev I., Dougal R., Santi E., Veselov G. Synergetic Control for m-Parallel Connected DC-DC Buck Converters // Proc. of IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC'04 Achen, Germany 2004. – P. 182-188.
15. Современная прикладная теория управления: Ч. I. Оптимизационный подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.; Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
16. Современная прикладная теория управления: Ч. II. Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.; Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 556 с.
17. Современная прикладная теория управления: Ч. III. Синергетический подход в теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.; Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 656 с.
18. Кузьменко А.А., Синицын А.С., Колесниченко Д.А. Принцип интегральной адаптации в задаче адаптивного управления системой «гидротурбина – синхронный генератор» // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 2-1 (56). – С. 146-150.
19. Попов А.Н. Синергетический синтез регуляторов для задач генерации колебательных режимов в технических системах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4 (129). – С. 156-162.
20. Веселов Г.Е. Иерархическое управление многосвязными динамическими системами: синергетический подход. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 72 с.
21. Колесников А.А., Кузьменко А.А. Синтез законов разрывного управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий метода АКАР // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 8. – С. 451-460.
22. Попов А.Н. Синергетический синтез следящих регуляторов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 7 (201). – С. 220-231.
23. Попов А.Н. Теоретические основы синтеза энергосберегающих регуляторов электромеханических систем // Современная наука и инновации. – 2016. – № 3. – С. 20-29.
24. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: Издательский дом «МЭИ», 2011. – 280 с.
25. Веселов Г.Е., Скляров А.А., Скляров С.А. Синергетический подход к управлению траекторным движением мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 7. – С. 20-25.
26. Колесников А.А., Топчев Б.В. Синергетический подход к проблеме формирования искусственной самоорганизации управляемых систем. Ч. 1, Ч. 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 1, 2.
27. Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 123-137.
28. Колесников А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. – М. : Физматлит, 2013. – 196 с.
29. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – Изд. стереотип. – М.: URSS, 2019. – 240 с.
30. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал.А., Топчев Б.В., Мушленко А.С., Кобзев В.А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – Изд. стереотип. – М.: URSS, 2019. – 300 с.
31. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В. Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы. – Изд. стереотип. – М.: URSS, 2019. – 248 с.
32. Колесников А.А. Гравитация и самоорганизация. – Изд. стереотип. – М.: ЛИБРОКОМ, 2016. – 104 с.

Синергетическая концепция при управлении процессами обработки на металлорежущих станках

Заковоротный Вилор Лаврентьевич

Донской государственный технический университет (ДГТУ)
Ростов-на-Дону, Россия
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Гвинджилия Валерия Енвериевна

Донской государственный технический университет (ДГТУ)
Ростов-на-Дону, Россия
sinedden@yandex.ru

Аннотация. В машиностроительном производстве получили распространение станки с ЧПУ, в которых с высокой точностью обеспечиваются траектории исполнительных элементов, задаваемые ЭВМ ЧПУ. Однако точность траекторий еще не гарантирует качество и эффективность изготовления деталей. В основу определения программы ЧПУ положена экспериментальная база знаний о рациональных технологических режимах, инструменте, смазочно-охлаждающей жидкости и пр. при обработке заданного класса деталей. Эта база знаний, отражающая некоторое усредненное представление по множеству станков, инструментов и условий обработки. При этом не принимаются во внимание изменения свойств системы резания вдоль траекторий движения и ее динамические характеристики. Цель настоящего исследования синергетическое согласование внешнего управления (программы ЧПУ) и динамики резания (внутреннее управление). Для достижения поставленной цели проводится математическое моделирование управляемой динамической системы резания, свойства которой изменяются за счет априорно заданных законов изменения параметров взаимодействующих подсистем. Раскрыта закономерность согласования программы ЧПУ с изменяющимися свойствами процесса, позволяющие повысить экономическую эффективность обработки при обеспечении требуемого качества к изготовлению партии деталей.

Annotation. In mechanical engineering production, CNC machines are widespread, in which the trajectories of the actuating elements set by the CNC computer are provided with high precision. However, the accuracy of the trajectories does not yet guarantee the quality and efficiency of the de-tool production. The NC program definition is based on the experimental knowledge base about the rational technological modes, tools, lubricant-cooling fluid etc. in machining of the given class of parts. This knowledge base reflecting some averaged representation for a set of machines, tools and machining conditions. It does not take into account changes in the properties of the cutting system along the motion paths and its dynamic characteristics. The goal of this study is to synergistically coordinate the external control (NC program) and the cutting dynamics (internal control). To achieve the goal, mathematical modeling of the controlled dynamic cutting system, the properties of which change due to a priori specified laws of changes in the parameters of interacting subsystems, is conducted. The regularity of matching the CNC program with the changing properties of the process, allowing to increase the economic efficiency of machining while ensuring the required quality to the production of a batch of parts, is disclosed.

Ключевые слова: эффективность обработки, самоорганизация и эволюция, синергетика согласования внешней и внутренней динамики.

Keywords: processing efficiency, self-organization and evolution, synergetic of harmonization of external and internal dynamics.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время сформировалась системно-синергетическая парадигма анализа и синтеза [1, 2]. Синергетический подход используется при управлении сложными нелинейными взаимосвязанными техническими системами [3–5], в том числе, процессами обработки на металлорежущих станках [6–9], а также при изучении динамики систем, взаимодействующих с различными средами [10]. При определении программ ЧПУ, задающих траектории исполнительных элементов (ТИЭ), используется база знаний, опирающаяся на различные представления о влиянии технологических параметров на обработку [11–14]. Показано, что на изнашивание инструмента влияет мощность, выделяемая в зоне резания. Она оценивается, как правило, по температуре [12, 14]. Для коррекции управляющих программ, зависящей от информационных обменов в подсистемах станка, разработаны различные приемы [15–20]. Показано, что одним из эффективных методов управления качеством изготовления деталей является управление упругими деформациями инструмента и заготовки [18]. Этот метод получил признание в тех случаях, когда жесткость обрабатываемой детали меняется вдоль ТИЭ станка [19–21]. Авторы предлагают для обработки этого класса деталей использовать локальные системы автоматического регулирования сил резания. Также показано, что выходные характеристики обработки зависят от состояния динамической системы (ДС) [22–28]. Отмечается, что ДС резания обладает свойством эволюционных изменений, зависящих от траектории мощности необратимых преобразований энергии по совершенной работе [28–31]. Следующим шагом, направленным на повышение эффективности обработки, является синергетическое согласование программы ЧПУ с ДС резания. Во-первых, необходимо согласовать технологические режимы и соответствующие им программы ЧПУ с ДС резания. Во-вторых, обеспечить это согласование с изменяющимися свойствами системы. Согласованию программы ЧПУ с изменяющимися вдоль траектории движения инструмента свойствами ДС резания посвящены приведенные в статье материалы.

II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим геометрическое пространство, привязанное к несущей системе станка, с осями $\{L_1, L_2, L_3\}^T \in \Re^{(3)}$, установленными в правом центре вращения заготовки (рис. 1). Дополнительно зададим траекторию вращения заготовки ($\Omega = da/dt$). Введем в рассмотрение векторы, характеризующие состояние системы резания.

1. Вектор ТИЭ станка

$\mathbf{L}(t) = \{L_1(t), L_2(t), L_3(t), L_4(t)\}^T \in \Re^{(4)}$. Это пространственные перемещения суппорта и вращения шпинделя. В традиционной компоновке $L_3(t) \equiv 0$. Этому вектору соответствуют скорости $\mathbf{V}(t) = \{V_1(t), V_2(t), V_3(t), V_4(t)\}^T \in \Re^{(4)}$, а также фазовые траектории $\{L_i(t), V_i(t)\}, i=1,2,3,4$. Причем, $V_4 = \pi D \Omega$. Совокупность $\mathbf{L}(t)$ и $\mathbf{V}(t)$ определяется программой ЧПУ.

2. Траектории деформаций

$\mathbf{X}(t) = \{X_1(t), X_2(t), X_3(t), Y(t)\}^T \in \Re^{(4)}$ и их скоростей $\mathbf{v}_X(t) = \{v_{X,1}(t), v_{X,2}(t), v_{X,3}(t), v_{X,4}(t)\}^T \in \Re^{(4)}$. Деформации удобно отсчитывать в направлениях, противоположных $\mathbf{L}(t)$ и $\mathbf{V}(t)$.

3. Рассмотрим также траектории

$\mathbf{l}(t) = \{l_1(t), l_2(t), l_3(t), l_4(t)\}^T \in \Re^{(4)}$ формообразующих движений, формируемых по правилу

$$\mathbf{l}(t) = \mathbf{L}(t) - \mathbf{X}(t), \quad (1)$$

а также их скоростей $\mathbf{v}(t) = \{v_1(t), v_2(t), v_3(t), v_4(t)\}^T \in \Re^{(4)}$,

то есть $\mathbf{l}(t) = \int_0^t \mathbf{v}(\xi) d\xi$. Если заданы $\mathbf{l}(t)$, то определена и скелетная геометрическая топология $\Psi^{(1)}$ формируемой резанием поверхности [7–9]. Тогда целью управления является выбор $\mathbf{L}(t)$ таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\mathbf{l}(t) \in \Psi^{(1)} \subset \Psi^{(0)}, \quad (2)$$

где $\Psi^{(0)}$ определяет требование к качеству поверхности. При этом дополнительно необходимо обеспечить минимум приведенных затрат на изготовление партии деталей. Это условие считается достижимым, если $\mathbf{l}(t)$ управляются с помощью $\mathbf{L}(t)$.

При пересечении тела инструмента с заготовкой, в зоне резания образуются сложные физические взаимодействия, представляемые в виде формируемой резанием динамической связи. Эта связь объединяет физические подсистемы в единую систему резания. В данном исследовании мы ограничимся механическими подсистемами. Тогда взаимодействие характеризуется силами $\mathbf{F}(t) = \{F_1(t), F_2(t), F_3(t), F_4(t)\}^T \in \Re^{(4)}$, $F_4(t) \equiv -F_1(t)$ которые вызывают упругие деформации $\mathbf{X}(t)$. Параметры, характеризующие пересечение инструмента и заго-

товки, есть технологические режимы (подача, глубина и скорость резания): $T(t) = \{S_p(t), t_p(t), V_p(t)\}^T$. Они связаны с траекториями $V(t)$ и $v_X(t)$ соотношениями

$$S_p(t) = \int_{t-T}^t [V_2(\xi) - v_{X,2}(\xi)] d\xi; \quad V_p(t) = V_3(t) - v_{X,3}(t); \quad (3)$$

$$t_p(t) = d/2 - \int_0^t [V_1(\xi) - v_{X,1}(\xi) - v_{X,4}(\xi)] d\xi,$$

где $T = (\Omega)^{-1}$ – время оборота в [с].

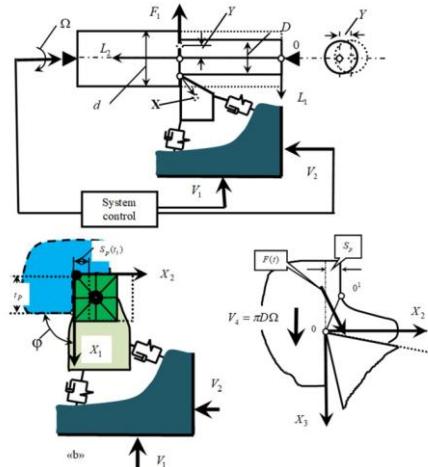


Рис. 1. Схема взаимодействия приводов вращения шпинделя и подачи суппорта, а также формирования динамической связи процесса резания

Полагаем, что крутильный деформации заготовки отсутствуют, обрабатывается заготовка неизменного диаметра, а система рассматривается невозмущенной. Таким образом, подача $S_p(t)$ определяется оператором интегрирования суммарной скорости во временном окне, определяемом частотой вращения заготовки. Если в (3) деформации отсутствуют и все скорости постоянны, то $\mathbf{T}_0 = \{S_p^{(0)}, t_p^{(0)}, V_p^{(0)}\}$. Для определения деформаций в (3) будем опираться на исследования [32], тогда

$$\mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c}\mathbf{X} = \mathbf{F}(S_p, t_p, V_p), \quad (4)$$

где $m = [m_{s,k}]$ $m_{s,k} = m_i$, при: $s = k$, $m_{s,k} = 0$, при: $s \neq k, s, k = 1, 2, 3, 4$, $m_{1,1} = m_{2,2} = m_{3,3} = m$, $m_{4,4} = m_0$ в $\text{кгс}^2/\text{мм}$, $h = [h_{s,k}]$ в $\text{кгс}/\text{мм}$, $h_{s,4} = h_{4,s} = 0$, $s = 1, 2, 3$, $c = [c_{s,k}]$, $s, k = 1, 2, 3, 4$, $c_{s,4} = c_{4,s} = 0$, $s = 1, 2, 3$, в $\text{кг}/\text{мм}$ – симметричные, положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; жесткость заготовки $c_{4,4} = c_0(L_2)$. Проекции \mathbf{F} в пространстве $\Re^{(3)}$ определяются коэффициентами $F_i = \chi_i F_0$, $i = 1, 2, 3$, удовлетворяющими условиям $\sum_{i=1}^{i=3} (\chi_i)^2 = 1$. Здесь учитывается $F_4 = -F_1$.

Коэффициенты χ_i зависят от геометрии инструмента и неизменны, если не принимать во внимание износ. При обработке детали сложной геометрии коэффициенты χ_i и матрицы c изменяются в зависимости от траектории. Возможность рассмотрения деформаций заготовки в скалярном виде объясняется круглым сечением заготовки. Тогда любая ортогональная системе координат, нормальная к оси вращения является главной.

Остановимся на модели сил. Учтем зависимость \mathbf{F} от площади срезаемого слоя S , скорости резания и их запаздывание. Тогда

$$\mathbf{F}(\mathbf{t}) = F^{(0)}(t) \{\chi_1, \chi_2, \chi_3, -\chi_1\}^T, \quad (5)$$

где $T^{(0)} dF^{(0)} / dt + F^{(0)} = \rho K_1 K_2 K_3$, $K_1 = [t_P^{(0)} - X_1 - Y]$, $K_2 = 1 + \mu \exp[-\zeta(V_3 - v_{X,3}(t))]$,

$$K_3 = \int_0^t \{V_2(\xi) - v_{X,2}(\xi)\} d\xi, \quad \rho \text{ - давление в } [\text{кг/мм}^2];$$

ζ – параметр крутизны сил в $[c/\text{мм}]$; μ – безразмерный коэффициент; $T^{(0)}$ – параметр, определяющий запаздывание сил. Системы (1) – (5) позволяют выяснить связь ТИЭ станка с $\mathbf{L}(\mathbf{t})$, и, следовательно, определить $\mathbf{L}(\mathbf{t})$ и $\mathbf{V}(\mathbf{t})$, обеспечивающие (2).

Конструирование желаемого аттрактора. Как отмечено, целью управления является выбор ТИЭ $\mathbf{L}(\mathbf{t})$ и $\mathbf{V}(\mathbf{t})$ такими, чтобы при минимизации затрат на изготовление партии деталей обеспечить условие (2). Для решения этой задачи, прежде всего, необходимо выбрать $\mathbf{L}(\mathbf{t})$ и $\mathbf{V}(\mathbf{t})$, удовлетворяющими условию (2). Мы получаем множество ТИЭ, из которого необходимо выбрать

$$\mathbf{L}(\mathbf{t}) \in \Psi^{(0)} \subset \Psi^{(L)}, \quad (6)$$

где $\Psi^{(L)}$ – множество асимптотически устойчивых траекторий. Тогда из $\Psi^{(L)}$ необходимо определить $\Psi^{(*)}$ и траектории $\mathbf{L}^{(*)}(\mathbf{t})$ и $\mathbf{V}^{(*)}(\mathbf{t})$, которые обеспечивают минимум приведенных затрат на изготовление партии деталей. Рассмотрим последовательность решения этой задачи.

На первом этапе определим траектории множества $\Psi^{(0)}$. Поставим задачу определения V_2 так, чтобы отклонение диаметра $\Delta D = 2(X_1 + Y) = const$. Функцию $c_0[L_2(t)]$ можно считать постоянной в пределах импульсной реакции системы. Тогда для определения связи ΔD и V_2 можно воспользоваться системой

$$X_1 + Y = \frac{\Delta_{X_1} + \Delta_Y}{\Delta} = const, \quad (7)$$

$$\text{где } \Delta = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho_0 V_2 T & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \rho_0 V_2 T \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho_0 V_2 T & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \rho_0 V_2 T \\ c_{1,3} + \chi_3 \rho_0 V_2 T & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \rho_0 V_2 T \\ \chi_1 \rho_0 V_2 T & 0 & 0 & c_0(L_2) + \chi_1 \rho_0 V_2 T \end{bmatrix};$$

$$\rho_0 = \rho \{1 + \mu \exp[-\zeta(V_3)]\};$$

$$\Delta_{X_1} = \rho_0 t_P^{(0)} V_2 T \begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \rho_0 V_2 T \\ \chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \rho_0 V_2 T \\ \chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \rho_0 V_2 T \\ \chi_1 & 0 & 0 & c_0(l_2) + \chi_1 \rho_0 V_2 T \end{bmatrix};$$

$$\Delta_Y = \rho_0 t_P^{(0)} V_2 T \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho_0 V_2 T & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho_0 V_2 T & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \\ c_{1,3} + \chi_3 \rho_0 V_2 T & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \\ \chi_1 \rho_0 V_2 T & 0 & 0 & \chi_1 \end{bmatrix}.$$

В (7) задаются все параметры, в том числе $c_0(L_2)$, и определяется закон $V_2(L_2)$, который является фазовой траекторией продольного перемещения суппорта. Задаваемые системой ЧПУ ТИЭ станка скрыты в (7) в параметрах T , $t_P^{(0)}$. Их множество определяет и множество траекторий $V_2(L_2)$. Из этого множества необходимо выбрать траектории, удовлетворяющие (6). Для этого необходимо вычислить точки равновесия, определить уравнение в вариациях относительно этой точки, его линеаризовать и исследовать известными приемами [33]. Не останавливаясь на деталях, приведем линеаризованное в окрестности равновесия уравнение в вариациях, соответствующее (4) и (5)

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{z}(\mathbf{t})}{dt^2} + \mathbf{H} \frac{dz(\mathbf{t})}{dt} + \mathbf{C} z(\mathbf{t}) = \mathbf{0}, \quad (8)$$

где $\mathbf{z}(\mathbf{t}) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), y(t), f(t)\}^T$;

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & h_{3,1} & 0 & 0 \\ h_{1,2} & h_{2,2} & h_{3,2} & 0 & 0 \\ h_{1,3} & h_{2,3} & h_{3,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_{5,5} \end{bmatrix};$$

$$h_{3,5} = -\rho(t_P^{(0)} - X_1^*) S_P^{(0)} \zeta \mu \exp(-\zeta V_3);$$

$$h_{5,5} = \frac{k S_P^{(0)} (t_P^{(0)} - X_1^*)}{V_3},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} & 0 & -\chi_1 \\ c_{1,2} & c_{2,2} & c_{3,2} & 0 & -\chi_2 \\ c_{1,3} & c_{2,3} & c_{3,3} & 0 & -\chi_3 \\ 0 & 0 & 0 & c_0(L_2) & -\chi_1 \\ c_{1,5} & c_{2,5} & 0 & c_{4,5} & 1 \end{bmatrix};$$

$$c_{1,5} = \rho \{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} S_P^{(0)}; .$$

$$c_{2,5} = \rho \{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} [t_P^{(0)} - X_1^*];$$

$$c_{4,5} = \rho \{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} S_P^{(0)}.$$

Приведем пример областей устойчивости в плоскости варьируемых технологических режимов, непосредственно связанных с ТИЭ станка (рис. 2) зависимостями (3). Области вычислены по методу D-разбиения. Параметры подсистем со стороны режущего инструмента и заготовки, а также формируемой процессом резания динамической связи приведены в табл. 1 и табл. 2. При построении областей устойчивости приняты закономерности связи параметров

динамической связи и технологических режимов [5, 6]. Обобщенные массы системы равны: для подсистемы инструмента $m = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{мм}$, для подсистемы обрабатываемой заготовки учитывается взаимосвязь обобщенной массы m_0 и изменяющейся вдоль траектории упругости.

При $L_2 = 0$ $m_0 = 5 \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{мм} \cdot 10^{-3}$. Параметры динамической связи приведены для начальной стадии процесса резания, когда величина износа по задней грани не превышает 0,1 мм.

ТАБЛИЦА 1. МАТРИЦЫ СКОРОСТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ И УПРУГОСТИ

$h_{1,1}$	$h_{2,2}, h_{3,3}$	$h_{1,2} = h_{2,1}$	$h_{1,3} = h_{3,1}$, $h_{2,3} = h_{3,2}$	h_0
0,25	0,15	0,1	0,08	0,18
$c_{1,1}$	$c_{2,2}, c_{3,3}$	$c_{1,2} = c_{2,1}$	$c_{1,3} = c_{3,1}$, $c_{2,3} = c_{3,2}$	c_0
1000	800	200	100	200-300

ТАБЛИЦА 2. ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

$\rho, [\text{кг} / \text{мм}^2]$	$\zeta, \text{м/с}$	$T_0, \text{с}$	μ
500	0,1	0,001-0,005	0,5

В зависимости от технологических параметров точка на рис. 2 может пересекать фигутивную линию. Тогда синтезированная траектория становится неустойчивой. Потеря устойчивости зависит и от жесткости $c_0(l_2)$, изменяющейся вдоль траектории. Для обеспечения условия (6) необходимо изменить параметры подсистем конструкторными методами или, например, откорректировать траекторию скорости резания. Выбор синтезированных траекторий из условия их асимптотической устойчивости характеризует второй этап синергетического синтеза. Тогда эти траектории являются аттракторами. При первом использовании аббревиатур в тексте необходимо давать их расшифровку. Страйтесь избегать использования аббревиатур в заголовках разделов.

На третьем этапе из множества выбираются траектории, обеспечивающие минимум интенсивности изнашивания инструмента. В этом случае учитывается связь мощности необратимых преобразований подводимой к резанию энергии. Тогда после интегрирования мощности условия оптимальности определяется минимумом работы сил резания на заданном пути [29–32].

Во всех случаях при выборе траекторий необходимо знать закон связи между траекториями исполнительных элементов и силами. В рассматриваемом случае упругими деформационными смещениями удобно управлять изменением скорости подачи. Однако для этого необходимо уточнить закон преобразования скорости подачи в силы.

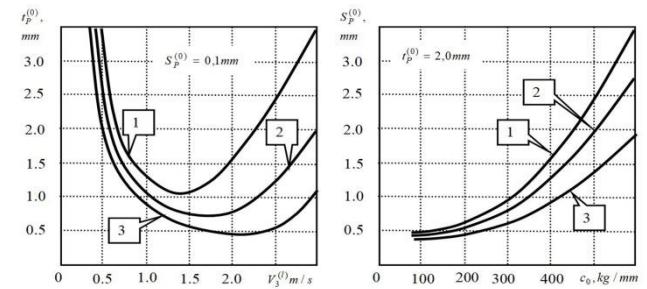


Рис. 2. Области устойчивости «замороженной» системы при различных значениях износа w_0 : 1 – $w_0=0,05$; 2 - $w_0=0,1$; 3 - $w_0=0,15$

III. ЗАКОН ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СКОРОСТИ ПОДАЧИ В ЕЕ ВЕЛИЧИНУ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ТОЧЕНИИ

Сложность преобразования объясняется тем, что в нем необходимо учитывать не только перемещение суппорта, но и упругие деформационные смещения вершины инструмента. Рассмотрим проблему преобразования $V_2 \Rightarrow S_p$. Ограничимся случаем, когда в (5) $\mu \rightarrow 0$. Тогда система (5) является линейной, поэтому можно воспользоваться преобразованием Лапласа [34] и анализировать передаточную функцию

$$W(p) = \frac{S_p(p)}{V_2(p)} = \frac{1-\exp(-Tp)}{p} \frac{1}{1+A[1-\exp(-Tp)]} \quad (9)$$

где $A = \chi_2 \rho^{(0)} t_p^{(0)} / c_2^\Sigma$ – отношение жесткости резания $\chi_2 \rho^{(0)} t_p^{(0)}$ к жесткости упругой системы c_2^Σ , это жесткость всей подсистемы инструмента, приведенная к направлению скорости подачи. Выражение (8) позволяет проанализировать частотные свойства преобразования $V_2 \Rightarrow S_p$, а также условия, при которых система теряет устойчивость. Если $A \rightarrow 0$, то $W(p) \Rightarrow \frac{1-\exp(-Tp)}{p}$.

При анализе управления деформационными смещениями используют принцип разделения движений и рассматривают частотный диапазон, ограниченный полосой пропускания приводов [35, 36]. Тогда $W(p) \Rightarrow \frac{1-\exp(-Tp)}{p\{1+A[1-\exp(-Tp)]\}}$. Для этого случая рассмотрим $W(j\omega)$ (рис. 3). При $A \rightarrow 0$ частотная характеристика обусловлена оператором $\int_{t-T}^t V_2(\xi) d\xi$. Она раскрывает тот факт, что S_p есть путь, пройденный инструментом относительно заготовки в течение периода ее вращения. Поэтому составляющие изменения V_2 равные или кратные частоте вращения заготовки после интегрирования обращаются в ноль ($\text{Mod}[W(j\omega)] = 0$).

Можно сделать вывод: управление упругими деформационными смещениями инструмента относительно заготовки на частотах, равных или кратных частоте ее вращения, с помощью изменения скорости подачи не представляется возможным.

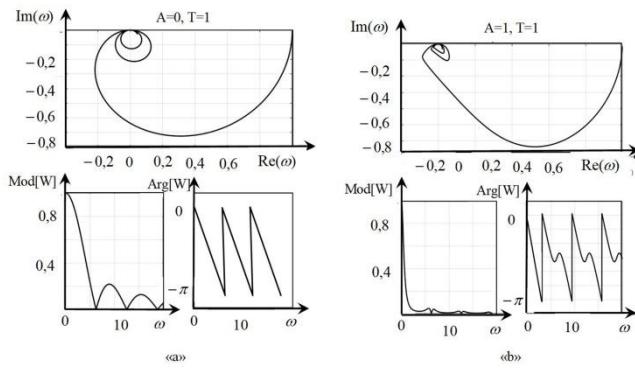


Рис. 3. Пример частотных характеристик преобразования скорости подачи в модуль силы резания: а - $A=0$, б - $A=1$

Увеличение $(c_2^{\Sigma})^{-1}$ вызывает уменьшение полосы пропускания $W(j\omega)$, что приводит к затягиванию переходного процесса (рис. 4). Здесь рассматривается не компонента матрицы жесткости подсистемы инструмента, а суммарная упругая реакция, в том числе, приведенная упругость привода подачи. Зависимость от упругости переходных процессов объясняется функциональной связанныстью сил и деформаций. Если вдоль траектории исполнительных элементов станка изменяются упругость c_2^{Σ} , давление $\rho^{(0)}$ и угловые коэффициенты χ_2 , зависящие от геометрии инструмента и направления скорости, то меняются переходные функции преобразования V_2 в деформационные смещения. Для уменьшения влияния изменяющейся упругости на динамику системы управления необходимо повышать жесткость всех элементов взаимодействующих подсистем.

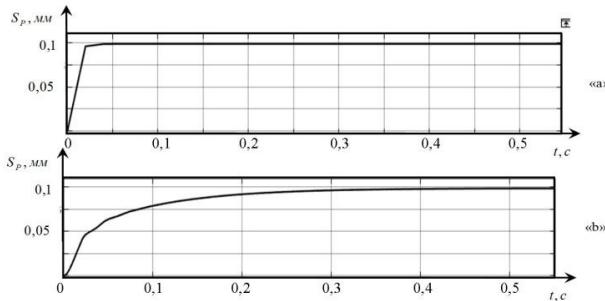


Рис. 4. Пример переходных процессов установления величины подачи при единичном возмущении скорости подачи и $\Omega = 50 \text{ c}^{-1}$: а - $A=0,1$; б - $A=1,0$

IV. УЧЕТ ЭВОЛЮЦИИ СИСТЕМЫ

В процессе согласования управления с динамической системой резания необходимо рассматривать не свойства системы при $t \rightarrow \infty$, а текущие характеристики динамики, обладающие свойством эволюционных изменений. Приведенный пример (рис. 4) показал, что переходные процессы в системе являются достаточно длительными даже по сравнению с импульсными реакциями приводов исполнительных элементов. Если же принять во внимание изменение топологии притягивающих множеств деформационных смещений в ходе установления стационарного состояния системы, то станет ясно, что согласование необходимо выполнять непосредственно в ходе эволюции. Приведем пример эволюционных преобразо-

ваний системы резания, которые определяются свойствами оператора $\int_{t-T}^t V_2(\xi) d\xi$ (рис. 5). Траектории деформационных смещений складываются из траекторий на участке $0-t$, из которых вычитаются траектории на участке $0-(t-T)$. Это естественно, так как

$$\int_{t-T}^t V_2(\xi) d\xi = \int_0^t V_2(\xi) d\xi - \int_0^{t-T} V_2(\xi) d\xi.$$

Поэтому в зависимости от параметров системы, прежде всего коэффициента $A = \chi_2 \rho^{(0)} t_P^{(0)} / c_2^{\Sigma}$, имеет место достаточно сложная трансформация суммарной траектории. При этом имеют место образование и изменение различных притягивающих множеств деформационных смещений, отображающихся на выходных характеристиках процесса обработки.

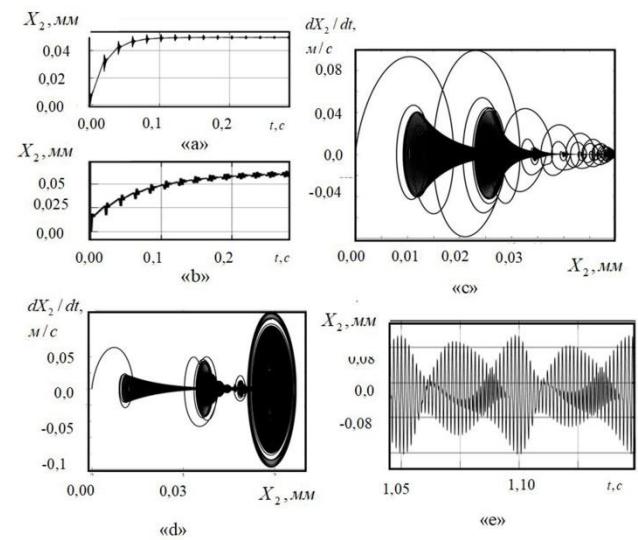


Рис. 5. Примеры переходных процессов деформационных смещений: а - функция $X_2(t)$ при врезании инструмента $\rho = 400 \text{ кг / мм}^2$; б - функция $X_2(t)$ при врезании инструмента $\rho = 600 \text{ кг / мм}^2$; в - фазовая траектория по п. «а»; г - фазовая траектория по п. «б»; д - установившаяся траектория при $\rho = 600 \text{ кг / мм}^2$

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс резания на металлорежущих станках представляет сложную нелинейную иерархически взаимосвязанную систему, в которой свойства обработки и его выходные характеристики изменяются в ходе обработки. В связи с этим имеет место проблема синергетического согласования программы ЧПУ (внешнее управление) и изменяющейся динамической системой резания (внутреннее управление). Раскрытие свойства такой системы и пример согласования для обработки деталей, жесткость которых изменяется вдоль траектории движения инструмента, может быть распространен на другие случаи, например, когда параметры динамической связи, формируемой резанием, изменяются в результате развития износа инструмента или от других причин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hermann Haken. Information and Self-Organization // Macroscopic Approach to Complex Systems.* – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 251 p. – ISSN: 0172-7389..
2. *Prigogine I., George C. The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems // Proceedings of the National Academy of Sciences.* – 1983. – Vol. 8. – P. 4590-4594.
3. *Колесников А.А. Синергетическая теория управления.* – М: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с. – ISBN: 5-230-24678-2.
4. *Колесников А.А. Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление, 2017. – Т. 18., № 9. – С. 579–589. – DOI: 10.17587/mau.18.579-589.*
5. *Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление, 2016. – Т. 17, № 10. – С. 657-669. – DOI: 10.17587/mau.17.657-669.*
6. *Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Фам Д.Т. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 10 (61). – С. 1785–1797. – DOI: 10.17587/mau.17.657-669.*
7. *Zakovorotny V.L., Gubanova A.D. Lukyanov Stability of shaping trajectories in milling: Synergetic concepts // Russian Engineering Research. – 2016. – 36 (11). – P. 956–964. – DOI: 10.3103/S1068798X16110216.*
8. *Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.D. Lukyanov Parametric self-excitation of a dynamic end-milling machine // Russian Engineering Research. – 2016. – 36(12). – P. 1033-1039. – DOI: 10.3103/S1068798X16120194.*
9. *Zakovorotny V.L., Gvindzhilya V.E. Influence of Spindle Wobble in a Lathe on the Tool's Deformational-Displacement Trajectory // Russian Engineering Research. – 2018. – 38 (8). – P. 623-631. – DOI: 10.3103/S1068798X1808018X.*
10. *Zakovorotny V.L., Flek M.B., Ugnich E.A. Synergetic approach to the modeling of industrial enterprise's economic activity // International Journal of Economic Perspectives, 2016. – 10 (4). – P. 371-375.*
11. *Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов.* – М.: Машиностроение. – 2009. – 640 с. – ISBN 978-94275-460-0.
12. *Лапшин В.П., Носачев С.В. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 44-58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.*
13. *Blau P. Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting // Procedia CIRP, 2015. – P. 361-366. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.058.*
14. *Kant G. Prediction and optimization of machining parameters for minimization power consumption and surface roughness in machining // Journal of Cleaner Production, 2014. – № 83. – P. 151- 164. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.002.*
15. *Martinov G.M., Ljubimov A.B., Martinova L.I. From classic CNC-systems to cloud-based technology and back // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – Vol. 63. – P. 101927. – DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101927.*
16. *Martinov G.M., Sokolov S.V., Martinova L.I., Grigoryev A.S., Nikishevchkin P.A. Approach to the diagnosis and configuration of servo drives in heterogeneous machine control systems // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10386 LNCS. – P. 586–594. – DOI: 10.1007/978-3-319-61833-3_62.*
17. *Sang Z., Xu X. The framework of a cloud-based CNC system // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 63. – P. 82-88. – DOI: 0.1016/j.procir.2017.03.152.*
18. *Базров Б.М., Балакшина Б.С. Адаптивное управление станками.* – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.
19. *Жданов А.А., Плотников А.Л., Чигиринский Ю.Л., Фирсов И.В. Математическая модель уточнения режимов резания для обеспечения точности токарной обработки нежёстких валов коррозионностойких*
- сталий на станках с ЧПУ/ А.А. Жданов, // Проблемы и инновации в области механизации и технологий в строительных и дорожных отраслях , 2016. – Т. 1, № 2 (2). – С. 36-40.
20. *Бобровский А.В., Драчев О.И. Технология механической обработки маложестких осесимметричных деталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 9 (232). – С. 15-17.*
21. *Драчев О.И. Система автоматического управления эксплуатационной точностью длинномерных валов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 5 (200). – С. 18-20.*
22. *Кудинов В.А. Динамика станков.* – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
23. *Воронов С.А., Киселев И.А. Нелинейные задачи динамики процессов резания // Машиностроение и инженерное образование. – 2017. – № 2 (51). – С. 9-23.*
24. *Gouskov A.M., Voronov S.A., Paris H., Batzer S.A. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2002. – Vol. 7. – P. 207-221. – DOI:10.1016/S1007-5704(02)00014-X.*
25. *Stepan G., Inspurge T., Szalai R. Delay, Parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2005. – Vol. 15, No. 9. – P. 2783-2798.*
26. *Corpus W.T., Endres W.J. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. – 2004. – Vol. 126 (3). – P. 467-474. – DOI: 10.1115/1.1765137.*
27. *Hasnul H. The Parametric Effect and Optimization on JIS S45C Steel Turning // International Journal of Engineering Science and Technology (IJECT). – 2011. – Vol. 3, No. 5. – P. 479-487.*
28. *Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2014. – Vol. 24 (9). – P. 189-201. – DOI: 10.1142/S0218127414501156.*
29. *Заковоротный В.Л., Гвнджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика, 2020. – Т. 28, № 1. – С. 46-61. – DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.*
30. *Заковоротный В.Л., Гвнджилия В.Е. Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в ходе эволюции свойств процесса обработки // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2018. – Т. 26, № 5. – С. 20-38. – DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.*
31. *Lapshin V.P., Turkin I.A., Khristoforova V.V. Assessment of metal wear in turning on the basis of components of the cutting force // Russian Engineering Research. – 2020. – Т. 40, № 9. – С. 797-800.*
32. *Заковоротный В.Л., Динь Тунг Фам, Суан Тьем Нгуен. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистем инструмента и заготовки при точении // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2011. – № 2 (160). – С. 38-46.*
33. *Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения.* – М.: Гостехиздат, 1950. – 472 с.
34. *Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования.* – М.: Наука, 1975. – 768 с.
35. *Заковоротный В.Л., Гвнджилия В.Е. Синергетическая концепция при программном управлении процессами обработки на металлорежущих станках // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 5 (734). – С. 24-36. – DOI: 10.18698/0536-1044-2021-5-24-36.*
36. *Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Фам Д.Т. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 10 (61). – С. 1785-1797. – DOI: 10.17587/mau.17.657-669.*

Моделирование взаимного влияния скважин и наземного оборудования на процесс неустановившейся фильтрации газа

Абрамкин Сергей Евгеньевич

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
abrsergey@yandex.ru

Душин Сергей Евгеньевич

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
dushins@yandex.ru

Сирота Даниил Дмитриевич

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
sdd.spb@outlook.com

Першин Иван Митрофанович

Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал)
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
в г. Пятигорске
г. Пятигорск, Россия
ivtmp@yandex.ru

Аннотация. Моделирование пласта является мощным инструментом получения информации о процессах, связанных с разработкой месторождения. В данной работе представлены модели процессов фильтрации газа в виде дифференциальных уравнений в частных производных, численная модель, представляющая собой неявную четырехточечную конечно-разностную схему, и применен метод конечных объемов. С использованием полученных моделей было разработано программное обеспечение, позволяющее производить моделирование для двумерного случая нестационарной фильтрации газа с учетом действия скважин и наземного оборудования.

Annotation. Reservoir modeling is a powerful tool for obtaining information about the processes associated with the development of a field. This paper presents models of gas filtration processes in the form of partial differential equations, a numerical model that represents an implicit four-point finite-difference scheme, and uses a finite volume method. Using the models obtained, software was developed that allows modeling for the two-dimensional case of non-stationary gas filtration taking into account the action of wells.

Ключевые слова: Модель неустановившейся фильтрации газа, численная модель фильтрации газа, компьютерная модель фильтрации газа, распределение давления в однородном газовом пласте.

Keywords: Model of unsteady gas filtration, numerical model of gas filtration, computer model of gas filtration, distribution of pressure in a homogeneous gas reservoir.

Текущая разработка ведется с целью получения компьютерной модели неустановившейся фильтрации газа в пласте, в рамках создания математической модели единого управляемого газодобывающего комплекса. Использование моделей, основанных на физически содер- жательных математических законах, позволяет управ-

лять разработкой месторождений, подбирая такие режимы эксплуатации, при которых снижаются риски возникновения и развития осложнений, а также повышаются коэффициенты извлечения углеводородов. При создании динамических моделей можно исследовать пласт более детально за счет разбиения его на блоки и применения к каждому из них уравнений фильтрации, что позволяет моделировать нестационарные процессы в пласте. Имеющиеся для этой цели пакеты программ (Eclipse, Tempest, tNavigator и др.) имеют высокую стоимость, требуют ежегодного обновления лицензии, и главное, выполнены в виде «черного ящика». В результате чего, отсутствует возможность корректировать программное обеспечение с целью создания моделей управляемых (и даже неуправляемых) процессов и разработки систем, базирующихся, в том числе, на современных методах и технологиях управления. Таким образом, возникает необходимость разработки математических и компьютерных моделей процессов фильтрации в пласте, а также программного обеспечения численного моделирования. Современная теория управления предлагает множество высокоеффективных методов, не ограничиваясь только простейшими регуляторами. Поэтому важной характеристикой программного обеспечения является возможность работы в режиме реального времени. Основные задачи данной работы:

- 1) построение численной модели неустановившейся фильтрации методом конечных объемов;
- 2) разработка программы моделирования фильтрационных процессов (симулятор);
- 3) анализ возможностей быстродействия компьютерной модели.

Непрерывные математические модели фильтрации

Рассмотрим случай одномерной фильтрации газа через объем пористой среды, как показано на рис. 1. Основные физические свойства пористой среды могут быть связаны с элементарным объемом. Рассматриваемый объем пористой среды должен быть представительным, т. е. он должен быть достаточно большим по сравнению с размером пор и малым по сравнению с размерами керна [1].

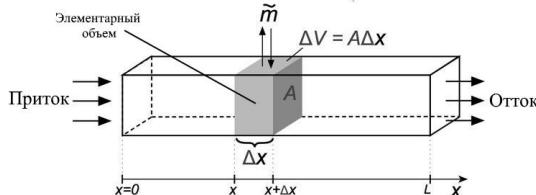


Рис. 1. Схема одномерной фильтрации в образце породы

Пусть \dot{m}_x – составляющая вектора потока массы флюида (расход массы через единицу площади в единицу времени) плотностью ρ (одна фаза, один компонент) вдоль оси x . Из рис. 1 видно, что приток массы через поверхность элементарного объема с координатой x за время Δt составляет $\dot{m}_x|_x \Delta t$, а отток массы через по-

верхность элементарного объема с координатой $x+\Delta x$ составит $\dot{m}_x|_{x+\Delta x} \Delta t$. Разница между поступающей и отбираемой массой равна приращению массы в элементарном объеме. Приращение массы в результате действия сжимаемости за время Δt равняется, $\left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi \Delta V) \right] \Delta t$,

а изменение массы благодаря действию источника или стока интенсивностью \tilde{m} (масса единицы объема в единицу времени) за время Δt – $\tilde{m} \Delta V \Delta t$. Таким образом, уравнение движения флюида через блок:

$$(\dot{m}_x|_x - \dot{m}_x|_{x+\Delta x}) \Delta t = \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi \Delta V) \right] \Delta t + \tilde{m} \Delta V \Delta t.$$

Поделив полученное выражение на $\Delta V \Delta t$, и переходя к пределу $\Delta x \rightarrow 0$, получим уравнение сохранения массы для данной системы:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} - \tilde{m}.$$

Выразим поток массы через скорость фильтрации (w) для случая движения флюида вдоль блока:

$$\dot{m}_x = \rho w_x.$$

В результате, подставляя уравнение фильтрации в уравнение сохранения массы, получим:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} - \tilde{m}.$$

Непрерывная математическая модель неустановившейся фильтрации

Для процессов, происходящих в нефтяных и газовых пластах, зависимость различных параметров от времени существенна. Такие процессы называются неустановив-

шимися (нестационарными). Задачи такого рода решаются методами математической физики. Для нестационарных процессов характерно перераспределение пластового давления, изменение во времени скоростей фильтрации, дебитов скважин. Количественные характеристики неустановившихся процессов зависят от упругих свойств пластов и насыщающих их флюидов. Основной формой пластовой энергии, обеспечивающей приток газа к скважинам, является энергия упругой деформации газа и твердого скелета пласта. Математическая модель неустановившейся фильтрации газа в деформируемой пористой среде, при допущениях, что проницаемость и вязкость постоянны, формируется путем подстановки закона сохранения импульса (в виде закона фильтрации Дарси) в уравнение неразрывности потока [2]. Тогда уравнение неразрывности потока и закон Дарси, соответственно:

$$-\left(\frac{\partial p \phi}{\partial t} \right) = \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z},$$

$$w = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z} \right),$$

где p – давление, t – время, ϕ – пористость, k – проницаемость, μ – вязкость, ρ – плотность газа, w – скорость фильтрации.

В результате математическая модель неустановившейся фильтрации газа имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right), \quad \kappa = \frac{k}{\mu(\beta_\pi + \phi\beta_r)}, \quad (1)$$

$$\beta_\pi = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} = \frac{\partial \phi}{\partial p}, \quad \beta_r = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p},$$

где κ – коэффициент пьезопроводности, β_π , β_r – коэффициенты сжимаемости породы и газа соответственно.

Уравнение (1) – основное уравнение теории упругого режима фильтрации. Коэффициент κ характеризует скорость перераспределения пластового давления при неустановившейся фильтрации упругого флюида в упругой пористой среде.

Построение численной модели фильтрации

Дискретизация уравнения неустановившейся фильтрации для одномерного случая.

Преобразуем уравнение фильтрации конечными разностями, используя неявную схему, так как неявные схемы обладают повышенными свойствами устойчивости по сравнению с явными, хотя и уступают им в быстродействии.

Рассмотрим одномерный пласт длиной L , разделенный на N пространственных блоков – конечных объемов (рис. 2) с использованием блочно-центрированной схемы (узлы сетки располагаются в центрах блоков).

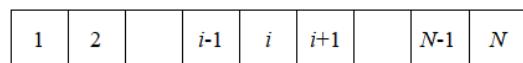


Рис. 2. Продуктивный пласт, дискретизированный на N блоков

В результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями получается следующая система линейных алгебраических уравнений [3]:

$$\frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} = \kappa \frac{p_{i-1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2}.$$

Вынесем временную и пространственную составляющие в виде отдельного множителя:

$$\eta = \frac{\kappa \Delta t}{(\Delta x)^2}.$$

Тогда уравнение одномерной фильтрации примет вид:

$$-\eta p_{i-1}^{n+1} + (1+2\eta) p_i^{n+1} - \eta p_{i+1}^{n+1} = p_i^n.$$

Система уравнений для блоков в матричной форме:

$$(\mathbf{I} + \eta \mathbf{A}) \mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{p}^n. \quad (2)$$

Конечно-разностные соотношения частных производных компонентов закона фильтрации, представленные ранее, имеют размерность давления. Однако, в случаях моделирования пласта с учетом скважин, более предпочтительной является запись в единицах расхода. Чтобы преобразовать к данному виду уравнение фильтрации, добавим следующее соотношение:

$$\frac{A \Delta x \phi c_t}{B_w \Delta t} = \frac{V \phi c_t}{B_w \Delta t},$$

где A , V – площадь и объем блока соответственно, B_w – объемный коэффициент флюида, c_t – сжимаемость.

Для удобства, введем соответствующие переменные для блоков:

$$B_i = \frac{V \phi c_t}{B_w}, \quad T_i = \frac{k A}{\mu B_w \Delta x}.$$

Переменные T и B обладают физическим смыслом. Коэффициент B отражает емкостные свойства блока, а T (проводимость) – фильтрационные. Для системы уравнений одномерной фильтрации матрица проводимостей является трёхдиагональной. Система уравнений (2), приведенная к единицам расхода, с учетом граничных условий, для случая отсутствия скважин будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{c|ccccc} B_1 & & & & & \\ \hline \frac{1}{\Delta t} & B_2 & \ddots & & & \\ & \ddots & & B_N & & \\ \hline \mathbf{B} & & & & & \end{array} \right] + \left[\begin{array}{ccccc} T(1+2\omega_1) & -T & 0 & 0 & 0 \\ -T & 2T & -T & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & -T & T(1+2\omega_2) \end{array} \right] \mathbf{p}^{n+1} \\ & = \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{c|ccccc} B_1 & & & & & \\ \hline B_2 & \ddots & & & & \\ \vdots & & B_N & & & \\ \hline \mathbf{B} & & & & & \end{array} \right] \mathbf{p}^n + \left[\begin{array}{c} 2\omega_1 T p_{B1} \\ 0 \\ \vdots \\ 2\omega_2 T p_{B2} \end{array} \right], \\ & \omega = \begin{cases} 0, & \text{если граничные условия Неймана (2 рода)} \\ 1, & \text{если граничные условия Дирихле (1 рода).} \end{cases} \end{aligned}$$

где p_{B1} , p_{B2} – давления для соответствующих граничных условий.

Или кратко:

$$\left(\mathbf{T} + \frac{\mathbf{B}}{\Delta t} \right) \mathbf{p}^{n+1} = \frac{\mathbf{B}}{\Delta t} \mathbf{p}^n + \mathbf{Q}, \quad (3)$$

где Q – расход флюида в блоке в результате действия источников/стоков (скважин).

Дискретизация уравнения неустановившейся фильтрации для двумерного случая.

Рассмотрим двумерный пласт длиной L и шириной W (рис. 3). Дискретизация по пространству выполняется путем разбиения области пласта на NX и NY узлов. Суммарное число блоков составляет $N = NX \times NY$. Каждый конечный объем обозначается индексами i и j (номер узла сетки в направлении x и y соответственно). Вместе с тем, возможна нумерация блоков одним целочисленным индексом, что является удобным при разработке алгоритмов для компьютерной модели. В данной работе принята нумерация пространственных блоков, в соответствии с соотношением: $l = (j-1)NX + i$ [4].

$j=NY=3$	9	10	11	12
$j=2$	5	6	7	8
$j=1$	1	2	3	4

$i=1 \quad i=2 \quad i=3 \quad i=NX=4$

Рис. 3. Продуктивный пласт, дискретизированный по пространству с использованием l -нумерации

В случае двумерной фильтрации, каждый блок взаимодействует с двумя, тремя или четырьмя соседними блоками, что определяет вид матрицы проводимостей. В качестве примера, рассмотрим вид \mathbf{T} для системы из рис. 3, при непроницаемых границах пласта (граничные условия 2 рода) и отсутствии скважин:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 2T & -T & & & & & & \\ -T & 3T & -T & & & & & \\ & -T & 3T & -T & & & & \\ & & -T & 2T & & & & \\ & & & & & & & \\ -T & & & 3T & -T & & & \\ & -T & & -T & 4T & -T & & \\ & & -T & -T & 4T & -T & & \\ & & & -T & -T & 3T & & \\ & & & & -T & & 2T & -T \\ & & & & & -T & -T & 3T & -T \\ & & & & & & -T & -T & 2T \end{pmatrix}$$

Таким образом, при использовании l -нумерации, матрица проводимостей является пятидиагональной. В остальном, система уравнений для двумерного случая аналогична системе (3).

Моделирование скважин

В рамках данной работы рассматривается случай однозначной фильтрации газа, при допущениях, что продуктивный пласт, вскрывается совершенными скважи-

нами с вертикальным окончанием, которые интерпретируются как внутренние границы пласта. Моделируемые скважины располагаются в центре блока. В пластовых симуляторах наиболее распространены два типа граничных условий (не считая смешанных): в виде заданного давления на забое (граничные условия 1 рода) или в виде заданного дебита скважины (граничные условия 2 рода). При такой постановке возможен расчет забойного давления, при заданном дебите и наоборот – расчет дебита, при заданном забойном давлении в зависимости от времени. Существует несколько связывающих соотношений для расчета неизвестных: модель Ван-Полена, модель Писмана и модель Абу-Кассема и Азиза. В настоящее время модель Ван-Полена почти не используется [4], а модель Абу-Кассема и Азиза удобна для расчетов при расположении скважин не в центре блоков. Поэтому, для учета скважин в данной работе используется модель Писмана, которая хорошо подходит для расчетов в блочно-центрированных сетках. Согласно данной модели радиус, при котором давление в блоке со скважиной соответствует средневзвешенному давлению в пласте (эквивалентный радиус) для случая квадратной сетки, задается следующим соотношением:

$$r_{eq} = 0,2\Delta x.$$

Чтобы перейти к расчету забойного давления добывающей скважины, работающей при режиме постоянного расхода, существует зависимость [4]:

$$P_{заб} = P_l + \frac{q_{скв}\mu B_{скв}}{2\pi kh} \ln\left(\frac{0.2\Delta x}{r_{скв}}\right) = P_l + \frac{q_{скв}}{J_l^{скв}},$$

где J – коэффициент продуктивности скважины, $r_{скв}$ – радиус скважины, P_l – средневзвешенное давление в блоке.

Вычислительный эксперимент

Программное средство может быть реализовано различными способами. В данной разработке был выбран язык программирования Python, за счет имеющихся в наличии эффективных расширений для работы с массивами и матрицами и отсутствия необходимости в приобретении лицензии. Тем не менее, компьютерная модель может быть успешно реализована и, например, средствами Matlab, C++ и др.

Решаемая симулятором задача математически сводится к аппроксимации дифференциальных уравнений двумерной неустановившейся фильтрации газа в пласте (трехмерность реальных месторождений учитывается введением мощности пласта). Координаты и расходы скважин, начальные и граничные условия, пластовые свойства и параметры флюида задаются в исходных данных. Затем рассчитывается коэффициенты T и B . Вычисляются номера блоков, содержащих скважины. Далее полученные матрицы, совместно с вектором расхода Q , преобразуются из плотных матриц в разреженные.

Выходными данными являются вычисленные значения давления в блоках с первым порядком точности по времени и вторым порядком точности по пространственной координате. Модель учитывает скважины, их взаимное влияние и рассчитывает давления на забое в зависимости от времени.

Для оценки возможностей быстродействия, решение задачи моделирования в симуляторе реализовано различными методами. В качестве исходных данных по части параметров флюида и породы-коллектора для вычислительного эксперимента использовались осредненные промысловые данные одного из объектов разработки существующего газового месторождения.

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение
Длина пласта (м)	3000
Ширина пласта (м)	3000
Высота пласта (м)	20
Пористость (д. ед.)	0,2
Проницаемость коллектора (м^2)	$12,9 \cdot 10^{-15}$
Начальное давление (Па)	$7 \cdot 10^6$
Вязкость газа (Па·с)	$2 \cdot 10^{-5}$
Координаты ($x ; y$) добывающей скважины №1 (м)	(1000; 1500)
Координаты ($x ; y$) добывающей скважины №2 (м)	(2000; 1500)
Расход газа в добывающей скважине №1 ($\text{м}^3/\text{сут}$)	$360 \cdot 10^3$
Расход газа в добывающей скважине №2 ($\text{м}^3/\text{сут}$)	$480 \cdot 10^3$

Скважины вскрывают пласт полностью и пускаются в работу одновременно, при этом пласт считается однородным. Пласт дискретизирован по пространственной координате на 90601 блоков (301 узел по координатам x и y). Конечное время моделирования – 300 сут с шагом в 1 сут. Полученные результаты моделирования процессов представлены на рис. 4, 5.

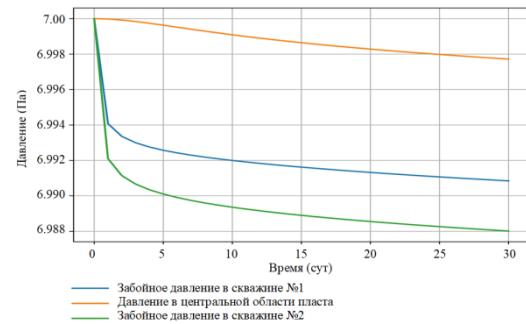


Рис. 4. Давление на забоях скважин и центральной точке пласта в зависимости от времени

Результаты моделирования показали, что в заданном пласте, при пуске в эксплуатацию двух добывающих скважин с соответствующими дебитами 360 и 480 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, значение давления в центральной области пласта на конечное время расчета составило 6997720 Па, в отличие от скважин №1 и №2, где давление на забое равно 6990840 и 6988011 Па соответственно. Темпы снижения давления особенно высоки в первые дни после запуска скважин.

С течением времени, характер и скорость снижения давления выравнивается по всей площади дренирования. Это связано со свойствами пласта, в частности, с коэффициентом пьезопроводности, который характеризует темпы распределения пластового давления.

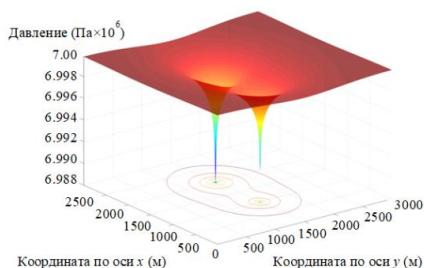


Рис. 5. Распределение давления в пласте на конечное время моделирования

В табл. 2 представлено сравнение быстродействия реализованных методов расчета для заданного случая, а также расхождения между полученными решениями в точке забоя скважины №2 на конечное время моделирования.

ТАБЛИЦА 2. БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МЕТОДОВ
(ПРОЦЕССОР INTEL CORE i5-6500 (3200MHz)
и 16 Gb ОЗУ)

Метод	Время расчета (с)	Полученное решение (Па)
LU – разложение	31.32	6988011.54
Метод сопряженных градиентов (CG)	4.29	6988011.56
Метод минимальных невязок (MinRes)	24.83	6988011.59
Обобщенный метод минимальных невязок (GMRes)	11.68	6988011.59
Стабилизированный метод бисопряженных градиентов (biCGStab)	7.14	6988011.61
Сдвоенный метод сопряженных градиентов (CGS)	12.86	6988011.51

Среди использованных итерационных алгоритмов, метод сопряженных градиентов, оказался наиболее близким к ответу, полученному прямым методом, при этом более, чем в 7 раз эффективнее по затратам времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При управлении разработкой месторождений газа, в качестве управляющих воздействий можно рассматривать расходы добывающих скважин. Полученная компьютерная программа-симулятор, при заданных значениях параметров пласта, флюида и расхода газа на выходе из скважин, рассчитывает распределение поля давления в однородном двумерном пласте в зависимости от времени, учитывая изменения забойных давлений скважин. Реализованные в симуляторе алгоритмы расчета показали высокую эффективность метода сопряженных градиентов, что делает возможным применение данной модели для целей синтеза системы управления газодобывающим комплексом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.
2. Куштанова Г.Г. Подземная гидромеханика. – Казань: Изд-во Казан. (Приволж.) федер. ун-та, 2010. – 67 с.
3. Алишаев М.Г. Моделирование и расчёт в прикладной механике и добыче нефти. – Махачкала: Изд-во АЛЕФ, 2015. – 288 с.
4. Эртекин Т., Абу-Кассем Дж., Кинг Г. Основы прикладного моделирования пластов. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 1060 с.

Синергетический синтез энергосберегающего регулятора для систем векторного управления синхронными двигателями с постоянными магнитами

Попов Андрей Николаевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
aprovov@sfedu.ru

Аннотация. Доклад посвящен решению задачи синтеза систем векторного энергосберегающего управления неявионполюсным синхронным двигателем с постоянными магнитами. Приведен вывод энергетического инварианта для данного типа двигателей. Представлена процедура синергетического синтеза регулятора. Продемонстрированы результаты компьютерного моделирования замкнутых систем управления. Проведен сравнительный анализ энергетических свойств двигателя при различных способах управления.

Annotation. The paper is devoted to the solution of the problem of synthesis of vector energy-saving control for permanent magnet synchronous motor. The derivation of the energy invariant for this type of motors is given. The procedure for the synergistic synthesis of the regulator is presented. The results of computer simulation of closed-loop control systems are demonstrated. A comparative analysis of the energy properties of the motor with different control methods is carried out.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, система управления, синергетический синтез регулятора, энергосберегающее управление.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, control system, synergistic synthesis regulator, energy-saving control.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) находят все большее применение в различных системах электрического привода промышленного и транспортного назначения. В качестве характерного примера можно привести бурно развивающуюся сейчас отрасль электромобилестроения. Практически все производители автомобилей с гибридной или электрической силовой установкой предпочитают использовать в тяговом электроприводе именно СДПМ, а не асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД).

Можно предположить, что подобная тенденция увеличения доли СДПМ в структурах электроприводов промышленных и транспортных систем будет сохраняться. Это связано со следующими преимуществами СДПМ по сравнению с АД:

- более высокий КПД (больше примерно на 2% при одинаковых мощности, конструкции статора и частотном преобразователе);
- более низкая инерционность ротора;
- более высокая удельная мощность;
- более широкий диапазон скорости с постоянной мощностью.

Традиционные недостатки СДПМ, связанные с их высокой стоимостью, сложностью пуска и выхода в синхронизм, фактически нивелированы за счет использования новых магнитных материалов, полупроводниковых преобразователей частоты и современных принципов управления двигателями переменного тока.

Использование СДПМ в системах современного электропривода обычно предполагает подключение его обмотки статора к преобразователю частоты с системой управления. Система управления реализует тот или иной принцип управления двигателя, выбор которого зависит от задачи, решаемой СДПМ в составе конкретного электропривода.

При необходимости плавного регулирования скорости двигателя во всем допустимом диапазоне используется принцип векторного или полеориентированного управления (FOC – field-oriented control) [1, 2].

Классическая система векторного управления СДПМ представляет собой двухканальную систему управления, в которой включенные в контур типовые регуляторы (обычно ПИ-регуляторы) формируют заданные значения проекций тока статора. Правило формирования этих значений определяют специфику различных систем векторного управления СДПМ.

Например, сейчас широко используется стратегия максимального крутящего момента на ампер (Maximum Torque per Ampere – МТРА). Соотношение проекций тока статора формируется исходя из условий максимизации момента при существующих токовых ограничениях. Реализация стратегии МТРА приводит к минимизации омических (электрических) потерь в обмотке статора при текущем моменте нагрузке.

Следует заметить, что в традиционных системах векторного управления СДМП с разными стратегиями все равно используются типовые ПИ-регуляторы. Расчет таких регуляторов теоретически основан на линейных или линеаризованных математических моделях двигателя, в принципе являющимся нелинейным динамическим объектом. В этой связи, для повышения точности регулирования применяют различные схемы компенсации ЭДС двигателя [2].

В настоящем докладе рассмотрено решение задачи синтеза регулятора для систем векторного управления СДМП, основанного на использовании исходной нелинейной модели двигателя и позволяющего реализовать режим минимизации суммарных электромагнитных потерь двигателя при изменяющихся условиях его эксплуатации.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ

При разработке систем векторного управления неявнополюсным СДМП используется следующая математическая модель, записанная относительно проекций токов и напряжений статора на оси координатной системы dOq , вращающейся синхронно с магнитным полем [1, 2]:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \left(\frac{3}{2} p \psi_f i_q - M_c \right) \frac{1}{J}; \\ \frac{di_d}{dt} &= (u_d - R_s i_d + p L_s i_q \omega) \frac{1}{L_s}; \\ \frac{di_q}{dt} &= (u_q - R_s i_q - p L_s i_d \omega - p \psi_f \omega) \frac{1}{L_s}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора; i_d, i_q – проекции тока статора на оси координатной системы; u_d, u_q – проекции напряжения статора на оси координатной системы; ψ_f – потокосцепление постоянных магнитов; p – число пар полюсов; R_s – активное сопротивление обмотки статора; L_s – индуктивность обмотки статора; J – момент инерции ротора; M_c – момент сопротивления нагрузки, создаваемый приводимым механизмом.

Анализируя математическую модель (1) можно заметить, что электромагнитный момент данного типа СДМП $M_e = 1,5 p \psi_f i_q$ определяется только текущим значением q-проекции тока статора. Таким образом, формируя заданное значение i_q путем изменения проекции напряжения u_q , можно обеспечить вращение двигателя с необходимой скоростью.

В большинстве систем векторного управления СДМП продольную проекцию тока i_d обычно обнуляют. Условие $i_d = 0$ соответствует минимуму омических потерь и для данного типа СДМП и аналогично реализации стратегии МТРА.

Другим вариантом управления двигателем по продольной оси является формирование отрицательных значений i_d . В этом случае ослабляется продольная составляющая магнитного поля и компенсируется соответствующая составляющая ЭДС вращения. Это позволяет расширить диапазон регулирования скорости двигателя. В работе [2] представлена общая стратегия управления СДМП по продольной проекции тока, основанная на определении условий длительно допустимой работы двигателя.

На наш взгляд, наличие независимого канала управления СДМП по продольной оси дает хорошую возможность реализовать энергосберегающее управление двигателем. Для этого необходимо обосновать и аналитически выразить оптимальное с точки зрения минимума суммарных потерь энергии значения d-проекции тока статора. Подобные аналитические выражения в синергетической теории управления принято называть энергетическими инвариантами [3–6].

III. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНВАРИАНТ СДМП

Решению проблемы энергосберегающего управления двигателями посвящено большое количество исследований. В [7–8] показано, что при выполнении определенных условий возможна минимизация уровня энергетических потерь в двигателях при изменении его скоростного режима и момента нагрузки на его валу.

Поставим задачу получения энергетического инварианта для неявнополюсного СДМП как выражения для вычисления значения проекции i_d , соответствующего минимуму суммарных потерь энергии при заданных значениях скорости двигателя и момента на его валу.

Электромагнитные потери мощности любого двигателя, уровень которых можно изменять путем соответствующего управления, складываются из потерь в меди обмоток (электрических потерь) и потерь в стали сердечников (магнитных потерь).

Потери в меди СДМП зависят от проекций тока статора и определяются известным выражением:

$$\Delta P_e = \frac{3}{2} (i_d^2 + i_q^2) R_s. \quad (2)$$

Потери в стали приближенно вычисляются по эмпирической формуле:

$$\Delta P_m = \Delta P_{m.nom.} \left(\frac{p \omega}{314} \right)^\beta \left(\frac{\psi_s}{\psi_{s.nom.}} \right)^2, \quad (3)$$

где ψ_s – потокосцепление обмотки статора, $\psi_{s.nom.}$ – его значение в номинальном режиме, $\Delta P_{m.nom.}$ – потери в стали в номинальном режиме, $\beta \approx 1,2$ – коэффициент, зависящий от марки стали.

Потокосцепление можно выразить через его проекции на оси координатной системы:

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{sd}^2 + \psi_{sq}^2}, \quad (4)$$

которые в свою очередь можно определить по проекциям токов и потокосцеплению постоянных магнитов:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_s i_d + \psi_f, \\ \psi_{sq} &= L_s i_q. \end{aligned} \quad (5)$$

Из условия равновесия первого уравнения модели (1) можно получить выражение для значения поперечной проекции тока статора в установившемся режиме:

$$i_q = \frac{2}{3p} \frac{M_c}{\psi_f}. \quad (6)$$

На основании полученных соотношений (2)–(6) можно получить выражение для суммарных электромагнитных потерь как функцию продольной проекции тока статора:

$$\begin{aligned} \Delta P_\Sigma(i_d) &= \frac{p^\beta \Delta P_{m.nom.}}{314^\beta \psi_{snom}^2} \omega^\beta \left(\left(L_s i_d + \psi_f \right)^2 + \left(L_s \frac{2}{3p} \frac{M_c}{\psi_f} \right)^2 \right) \\ &+ \frac{3}{2} R_s \left(i_d^2 + \left(\frac{2}{3p} \frac{M_c}{\psi_f} \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Решив задачу поиска локального минимума функции (7), из условия $\frac{\partial \Delta P_\Sigma}{\partial i_d} = 0$, можно найти оптимальное в смысле минимума потерь значение продольной проекции тока статора:

$$i_d^{opt} = -\frac{b_1 \omega^\beta \psi_f}{b_1 L_s \omega^\beta + 3R_s}, \quad (8)$$

$$\text{где } b_1 = \frac{2p^\beta \Delta P_{m.nom.}}{314^\beta \psi_{snom}^2} L_s.$$

Таким образом, для энергосберегающего управления неявнополюсным СДМП необходимо обеспечивать оптимальное значение i_d согласно (8). Очевидно, это значение будет отрицательным, а его величина будет зависеть от скорости вращения ротора двигателя.

Следует отметить, что энергетический инвариант СДМП отличается по структуре от энергетических инвариантов асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока [5, 6] и не зависит от момента сопротивления нагрузки двигателя.

IV. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА

Задача синтеза регулятора для систем векторного управления СДПМ формулируется как задача нахождения функций, определяющих математическую связь между текущими значениями переменных состояний и текущими значениями управляющих воздействий, т.е. функций вида $u_d = u_d(\omega, i_d, i_q)$ и $u_q = u_q(\omega, i_d, i_q)$. Эти

функции фактически определяют структуру регулятора как совокупности обратных связей, обеспечивающих выполнение задач управлений.

Поставим задачу синтеза регулятора, обеспечивающего стабилизацию угловой скорости ротора СДМП в заданном значении ($\omega = \omega^*$) и минимизацию суммарных потерь энергии.

Для решения этой задачи используется метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления [9, 10].

Процедура синергетического синтеза в рассматриваемом случае содержит один этап декомпозиции, которая имеет место на пересечении инвариантных многообразий:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \left(\frac{3}{2} p \psi_f i_q - M_c \right) - J k_1 (\omega - \omega^*) = 0, \\ \psi_2 &= i_d + \frac{b_1 \omega^{*\beta} \psi_f}{b_1 L_s \omega^{*\beta} + 3R_s} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

На пересечении этих многообразий динамика системы будет описываться уравнением

$$\frac{d\omega}{dt} = k_1 (\omega - \omega^*),$$

которое при $k_1 < 0$ обладает свойством асимптотической устойчивости относительно состояния $\omega = \omega^*$.

Таким образом, на многообразии $\psi_1 = 0$ обеспечивается выполнение требуемой задачи управления скоростью $\omega = \omega^*$, а на многообразии $\psi_2 = 0$ формируется оптимальное согласно (8) значение продольной проекции тока статора.

Искомый закон управления СДПМ ищется из решения системы функциональных уравнений метода АКАР

$$\begin{aligned} T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 &= 0, \\ T_2 \frac{d\psi_2}{dt} + \psi_2 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

в силу уравнений модели (1) и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_q &= a_3 i_q + a_4 i_d \omega + a_6 \omega + \\ &+ \frac{1}{a_1 a_2 a_5} \left(\begin{aligned} &\left(a_2 \frac{\partial M_c}{\partial \omega} - k_1 \right) (a_1 i_q - M_c) a_2 - \\ &- \frac{1}{T_1} \left((a_1 i_q - M_c) a_2 - k_1 (\omega - \omega^*) \right) \end{aligned} \right) \\ u_d &= a_3 i_d - a_4 i_q \omega - \frac{1}{a_5 T_1} (i_d + \lambda(\omega^*)) \end{aligned} \quad (11)$$

где $a_1 = 1.5 p \psi_f$, $a_2 = 1/J$, $a_3 = R_s$, $a_4 = p L_s$,

$$a_5 = 1/L_s, a_6 = p \psi_f, \lambda(\omega^*) = \frac{b_1 \omega^{*\beta} \psi_f}{b_1 L_s \omega^{*\beta} + 3R_s}.$$

При необходимости парирования внешнего возмущающего момента необходимо проводить процедуру синтеза регулятора с интегральной адаптацией [10, 11]. В этом случае в правую часть первого уравнения модели (1) аддитивно вводится дополнительная переменная z_1 :

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{3}{2} p \psi_f i_q - M_c + z_1 \right) \frac{1}{J}, \quad (12)$$

являющаяся оценкой внешнего возмущения.

При синтезе используется модель расширенной системы, состоящей из уравнений (1) с учетом (12) и уравнения

$$\frac{dz_1}{dt} = \beta(\omega - \omega^*).$$

Совокупность инвариантных многообразий задается как

$$\psi_1 = (1,5 p \psi_f i_q - M_c) - J k_1 (\omega - \omega^*) + l_1 z_1 = 0,$$

$$\psi_2 = i_d + \frac{b_1 \omega^{*\beta} \psi_f}{b_1 L_s \omega^{*\beta} + 3 R_s} = 0,$$

а полученный регулятор ищется из решения системы функциональных уравнений (10) и содержит в своей структуре интегральное звено по ошибке угловой скорости двигателя $\int (\omega - \omega^*) dt$.

V. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки эффективности разработанного регулятора было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы (1), (11).

В табл. 1 приведены параметры и номинальные данные СДПМ.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ И НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ СДПМ

Наименование параметра	Значение параметра
Мощность, кВт	125
Номинальная скорость, рад/с	209,33
Номинальный момент, Н·м	600
Сопотимление обмотки статора, Ом	0,02
Индуктивность обмотки статора, Гн	0,001
Момент инерции ротора, кг·м ²	1,57
Потокосцепление постоянных магнитов, Вб	0,89
Число пар полюсов	4
Номинальное потокосцепление статора, Вб	1
Номинальные потери в стали, кВт	1,1

При моделировании использовались следующие параметры настройки регулятора: $T_1 = T_2 = 0,1$, $k_1 = -10$.

На рис. 1–5 представлены графики переходных процессов переменных СДПМ. Имитировался разгон двигателя в номинальный режим и дальнейшее изменение уставки по скорости вращения ω^* .

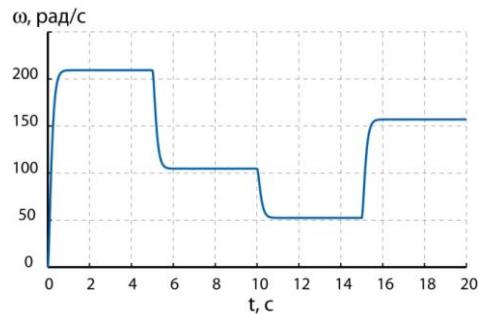


Рис. 1. Угловая скорость двигателя

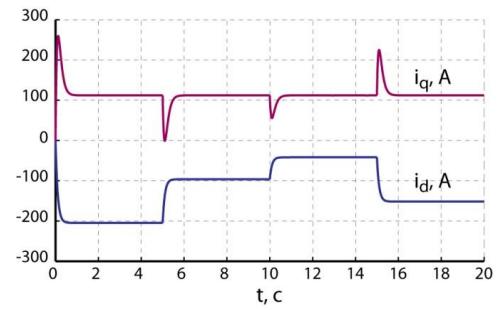


Рис. 2. Проекции тока статора

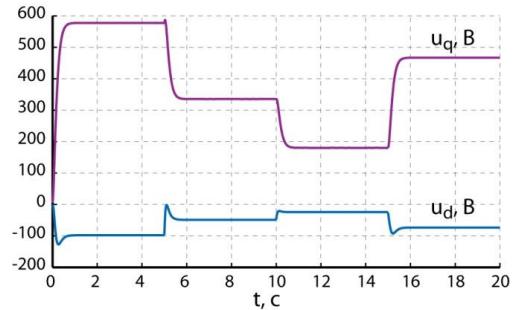


Рис. 3. Проекции напряжения статора

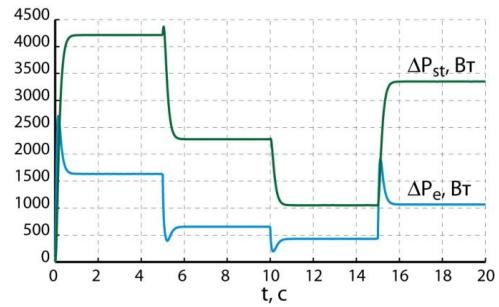


Рис. 4. Потери в меди и стали

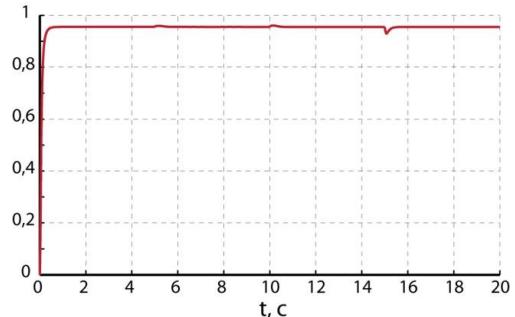


Рис. 5. КПД двигателя

Из графиков моделирования видно, что синтезированный регулятор обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы относительно заданного состояния. Использование энергетического инварианта (8) при синтезе регулятора позволило гибко управлять напряжением статора при изменении скоростного режима и обеспечивать постоянство КПД двигателя (рис. 5).

VI. АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В ходе компьютерного моделирования при разных законах управления СДПМ была проведена сравнительная оценка изменения КПД двигателя при варьировании заданной скорости вращения и момента сопротивления нагрузки. На рис. 6 представлена сравнительная диаграмма КПД при постоянном номинальном моменте и различных скоростях вращения ротора.

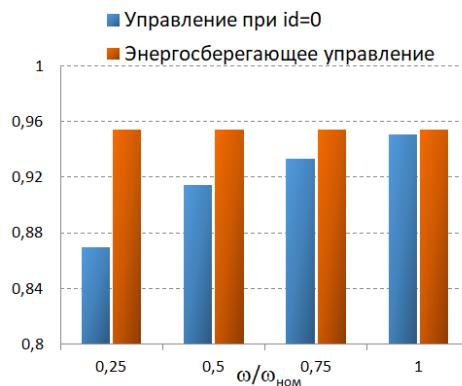


Рис. 6. Сравнительная диаграмма КПД двигателя при различных законах управления (номинальный момент, варьируемая скорость)

Анализируя диаграмму можно заметить, что использование энергосберегающего регулятора позволяет удерживать максимальный КПД двигателя во всем допустимом диапазоне изменения скорости.

На рис. 7 представлена сравнительная диаграмма КПД при постоянной номинальной скорости и различных моментах сопротивления нагрузки.

Уменьшение момента сопротивления нагрузки приводит к падению КПД в обоих вариантах управления СДПМ. Но в случае энергосберегающего управления это падение менее значительно.

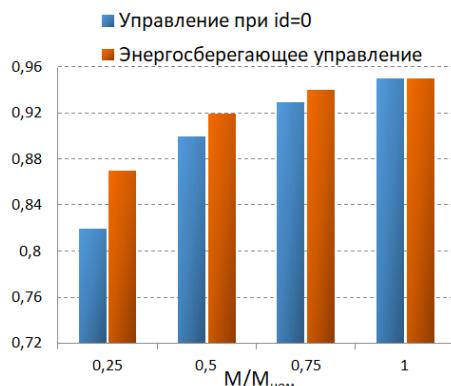


Рис. 7. Сравнительная диаграмма КПД двигателя при различных законах управления (варируемый момент, номинальная скорость)

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований синтезирован энергосберегающий регулятор для систем векторного управления неявнополюсными СДПМ. В ходе компьютерного моделирования были подтверждены теоретические выводы, предполагающие минимизацию суммарных электромагнитных потерь в двигателе при различных режимах его работы.

Синтезированный энергосберегающий регулятор позволяет повысить эффективность электромеханического преобразования энергии по сравнению со стандартной схемой, обеспечивающей обнуление продольной проекции тока статора, и может найти применение при разработке перспективных систем векторного управления СДПМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kwang Hee Nam. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. – CRC Press, 2019.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. Учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
3. Современная прикладная теория управления. Ч. III. Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. - Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2000.
4. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. и др. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – Изд. стереотип. URSS, 2019.
5. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. Инварианты электромеханических систем и вибромеханики // Синергетика и проблемы теории управления: Сб. науч. тр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – С. 251-269.
6. Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. – Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2003.
7. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Санлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979.
8. Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: практика / под ред. В.А. Веникова. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе. – М.: Высш. Школа, 1989.
9. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
10. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – Изд. стереотип. URSS, 2019.
11. Кузьменко А.А. Интегральная адаптация высокого порядка в задачах синтеза нелинейных систем управления // Информатика и системы управления. – 2018. – № 1 (55). – С. 142-153.

Синхронизация хаотических систем Арнеодо: сравнение синергетического закона скользящего управления с классическим

Кузьменко Андрей Александрович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
aakuzmenko@sfedu.ru

Аннотация. В работе показано применение метода синтеза закона управления с форсированным скользящим режимом (ФСР) синергетической теории управления (СТУ) к построению робастного закона управления синхронизацией хаотических систем Арнеодо. Выполнено сравнение полученного закона с классическим законом скользящего управления (*sliding mode control – SMC*). Основными отличительными особенностями закона управления с ФСР являются компенсация параметрических возмущений без синтеза наблюдателей возмущений, уменьшение ошибки синхронизации, возможность исключить chattering эффект.

Annotation. The paper shows the application of the method of control law's synthesis with a forced sliding mode (FSR) of the synergetic control theory (STU) to the construction of a robust control law for the synchronization of chaotic Arneodo systems. The obtained law is compared with the classical sliding mode control (SMC). Main distinctive features of the control law with FSR are the compensation of parametric perturbations without perturbation observers, the reduction of synchronization error, the ability to eliminate the chattering effect.

Ключевые слова: нелинейное управление, робастность, скользящее управление, форсированный скользящий режим, синергетическая теория управления.

Keywords: nonlinear control, robustness, sliding mode control, forced sliding mode, synergetic control theory.

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование хаотических систем (анализ свойств и поведения, синтез законов управления и др.) – это область современной нелинейной науки, которая чрезвычайно актуальна и находится в зоне пристального внимания теоретиков и практиков. Обзор литературы показывает, что эти системы находят широкое применение не только в области проектирования технических систем (генераторы колебаний, лазеры, крипtosистемы, системы защищенной передачи данных, нейронные сети и робототехнические системы), но и в биологии, химии, экологии, медицине, экономике и др. [1–19].

В качестве наиболее часто исследуемых и используемых хаотических систем выступают хаотические системы Лоренца, Чуа, Чена, Ресслера и др. А также перио-

дически предлагаются новые типы хаотических систем. В данной работе будет рассмотрена хаотическая система Арнеодо [4, 5]. Отметим, что в литературе, например, в [18, 19], представлена модель системы Арнеодо с иным видом правой части третьего уравнения системы – это т.н. fractional-order Arneodo's system.

Типовыми задачами управления хаотическими системами, помимо задач стабилизации стационарного состояния (обеспечение детерминированного поведения хаотической системы), являются задачи синхронизации и рассинхронизации (anti-synchronization). При этом в этих задачах хаотические системы могут состоять из однородных или разнородных моделей ведущей и ведомой систем. Из анализа литературы можно сделать вывод, что для решения задачи синхронизации хаотических систем традиционно применяются как методы линейной, так и нелинейной теории управления, например, методы активного и адаптивного управления, различные методы синтеза SMC, бэкстеппинг и др. [1–19].

Основная цель данной работы – продемонстрировать преимущества метода синтеза закона управления с ФСР СТУ в задаче обеспечения робастности при синхронизации двух хаотических систем Арнеодо. Метод синтеза закона управления с ФСР предложен проф. А.А. Колесниковым [20] и развивается в работах [21–25]. Этот метод базируется на методе АКАР СТУ и реализует устойчивое движение объекта управления к целевым аттракторам (инвариантным многообразиям) за счет соответствующего синтеза нелинейных законов управления. При этом выполняются цели управления, представленные в структуре инвариантных многообразий, и обеспечивается робастность к параметрическим возмущениям.

Преимущества предложенного закона управления проиллюстрированы на примере сравнения с законом управления с классическим SMC.

II. МЕТОДИКИ СИНТЕЗА

A. Методика синтеза закона с ФСР

В классических методах синтеза SMC при m каналах управления в объекте вводится до m поверхностей скольжения только на первом этапе синтеза законов

управления, т.е. организуется скольжение только первого уровня, и, соответственно, выражения поверхности скольжения задаются в явном виде. При этом в разных методах синтеза SMC в структуру поверхности скольжения могут входить и ее производные, и интегралы. В ФСР же, после обеспечения скольжения первого уровня, организуется скольжение второго, третьего и т.д. уровней [23–25]. Что не только ускоряет протекание переходных процессов, но и наделяет систему свойствами робастности к параметрическим и внешним возмущениям.

Методика синтеза законов управления с ФСР более детально изложена в [25], а примеры применения – в [23–25]. Здесь же приведем основные соотношения, необходимые для иллюстрации практического примера синтеза робастного закона управления при синхронизации двух хаотических систем Арнеодо.

Пусть исходные дифференциальные уравнения объекта управления имеют вид

$$\begin{aligned}\dot{x}_j(t) &= f_j(x_1, \dots, x_n) + a_{j+1}x_{j+1}, \quad j = \overline{1, n-1}; \\ \dot{x}_n(t) &= f_n(x_1, \dots, x_n) + u,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$ – вектор переменных состояния, $\dim \mathbf{x} = n \times 1$; $u = u(\mathbf{x})$ – скалярное управление, $f_i(x_1, \dots, x_n)$, $i = \overline{1, n}$ – непрерывные дифференцируемые функции (в общем случае нелинейные).

Для системы (1) ставится задача синтеза закона с ФСР: требуется определить такое управление $u = u(\mathbf{x})$ в функции переменных состояния объекта (1), которое обеспечивает перевод изображающей точки (ИТ) объекта из произвольного исходного состояния (в некоторой допустимой области) в заданное состояние, определяемое желаемым инвариантом (целью управления), и робастность к параметрическим возмущениям через последовательный переход по ряду поверхностей скольжения.

На k -м этапе синтеза закона управления с ФСР вводится многообразие вида

$$\psi_k = \sum_{j=1}^{n_k-1} \beta_{kj} |x_j| + |s_k| = 0 \quad (2)$$

с поверхностью скольжения k -го уровня

$$s_k = \sum_{j=1}^{n_k-1} \alpha_{kj} x_j + x_{n_k} + u_k(\mathbf{x}_k), \quad (3)$$

где $\mathbf{x}_k = [x_1, \dots, x_{n_k}]^T$ – вектор переменных состояния системы на k -м этапе синтеза; n_k – размерность системы на k -м этапе; α_{kj} , β_{kj} – параметры; $u_k(\mathbf{x}_k)$ – неизвестная на данном этапе непрерывная функция, играющая роль «внутреннего» управления для декомпозированной системы следующего, после k -го, этапа синтеза. Таким образом, из структуры (3) видно, что в общем случае поверхность скольжения задается неявно, т. к. содержит неизвестную функцию $u_k(\mathbf{x}_k)$.

На каждом этапе синтеза закона управления рассматривается основное функциональное уравнение метода АКАР [20]:

$$T_k \dot{\psi}_k(t) + \psi_k = 0, \quad (4)$$

где $\dot{\psi}_k(t) = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{\partial \psi_k}{\partial x_i} \dot{x}_i(t)$ – полная производная многообразия (2), определяемая в силу уравнений системы k -го этапа.

Тогда, раскрывая (4) в силу уравнений системы k -го этапа, многообразия (2) и поверхности скольжения (3), находим выражение соответствующего управления. Это управление переводит ИТ k -го этапа из некоторого начального состояния на многообразие $\psi_k = 0$ (2). В связи с тем, что движение относительно $\psi_k = 0$ (4) асимптотически устойчиво при $T_k > 0$, то это означает, что ИТ неизбежно попадает на подмногообразие (3), т.е. на поверхность скольжения.

После k -го этапа синтеза закона управления декомпозированная система для $(k+1)$ -го этапа получается путем подстановки в систему k -го этапа вместо переменной x_{n_k} выражения, полученного для нее из $s_k = 0$ (3), и исключения динамического уравнения $\dot{x}_{n_k}(t)$, в которое входит управление k -го этапа синтеза. Отметим, что если на k -м этапе синтеза закона управления многообразие (2) обеспечивает достижение целевого инварианта, то на этом этапе принимают в (3) $u_k(\mathbf{x}_k) = 0$. Иначе, переходят к следующему $(k+1)$ -му этапу синтеза, на котором для декомпозированной системы этого этапа осуществляется синтез «внутреннего» управления $u_k(\mathbf{x}_k)$: как правило, повторяя процедуру предыдущего этапа, либо используя другой метод синтеза (не из СТУ) или задавая выражение управления явным образом.

При необходимости процедуру декомпозиции можно повторять $(n-1)$ раз, пока порядок исходной системы (1) не станет равным единице, например, вида

$$\dot{x}_1(t) = f_1(x_1) - a_2 u_q(x_1) \quad (5)$$

или пока не обеспечим желаемый целевой инвариант (или целевые инварианты при векторном синтезе). Полученное выражение управления $u_q(x_1)$ для системы (5) подставляется в полученное на предыдущем этапе управление $u_{q-1}(x_1, x_2)$, которое, в свою очередь, подставляется в $u_{q-2}(x_1, x_2, x_3)$ и т. д., вплоть до управления $u_1(x_1, \dots, x_{n-1})$, непосредственно входящего в искомый закон управления $u = u(\mathbf{x})$ системы (1). Отметим, что для того чтобы исключить дифференцирования функции $\text{sign}(\square)$, входящей во «внутренние» управления, рекомендуется ее заменить на одну из эквивалентных непрерывных функций: $\text{th}(A\square)$ или $(2/\pi)\arctg(A\square)$, здесь A – большой коэффициент, (\square) – аргумент функции $\text{sign}(\square)$.

На каждом этапе синтеза необходимо проверять условие возникновения скользящего режима [26] по неравенству:

$$s_k \cdot \dot{s}_k(t) < 0, \quad (6)$$

или по функции Ляпунова: $V_k(\mathbf{x}) = 0,5s_k^2$.

Условия устойчивости замкнутой системы согласно СТУ [20] складываются из условий устойчивости всех введенных функциональных уравнений вида (4) и условий устойчивости финишной декомпозированной системы, размерность которой существенно меньше размерности исходной системы, например, вида (5).

Приведенная выше методика синтеза скалярного SMC с ФСР справедлива и для векторного синтеза: в этом случае на первом этапе синтеза по числу каналов управления вводятся многообразия вида (2), а последующие этапы идентичны этапам, описанным выше.

B. Методика синтеза классического SMC

Согласно [17, 26] исходную систему (1) представим в виде

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{Ax} + \mathbf{f}(\mathbf{x}) + u, \quad (7)$$

где \mathbf{A} – матрица состояния для линейной части системы, $\dim \mathbf{A} = n \times n$; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ – вектор нелинейных частей системы, удовлетворяющий условию $\mathbf{f}(0) = 0$, $\dim \mathbf{f}(\mathbf{x}) = n \times 1$.

Тогда задача управления сводится к синтезу управления $u = u(\mathbf{x})$ для системы (7), которое обеспечивает устойчивость состояния равновесия при любых начальных условиях (в некоторой допустимой области) [17].

Для системы (7) искомое управлениестоится в виде [17]

$$u = -\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{Bv}, \quad (8)$$

где \mathbf{B} – вектор-столбец, такой что пара матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) управляема; v – некоторое скалярное управление, состоящее из непрерывной и разрывной компонент.

Если выражение (8) подставить в систему (7), то получается система с линейной динамикой с одним управлением [17]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bv}. \quad (9)$$

Тогда проблема построения нелинейного закона управления (8) преобразуется в эквивалентную задачу построения управления для линейной системы (9).

Для этого на первом этапе синтеза рассматривают поверхность скольжения линейного вида

$$s = s(\mathbf{x}) = \mathbf{Cx}, \quad (10)$$

где \mathbf{C} – вектор-строка параметров, определяемых в ходе синтеза, $\dim \mathbf{C} = 1 \times n$.

При движении по поверхности скольжения выполняются соотношения [17, 26]

$$s(\mathbf{x}) \equiv 0 \quad u \quad \dot{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{CAx} + \mathbf{CBv} = 0. \quad (11)$$

Отсюда, при условии что $\mathbf{CB} \neq 0$, получим так называемое эквивалентное управление (equivalent control) – непрерывную компоненту управления v :

$$v_{eq} = -(\mathbf{CB})^{-1} \mathbf{CAx}.$$

Система (9) под действием эквивалентного управления описывает движение по поверхности скольжения $s(\mathbf{x}) = 0$.

На втором этапе синтеза осуществляется синтез итогового выражения для управления v с учетом разрывной компоненты. Рассматривается движение к поверхности скольжения (reaching law) [17]

$$\dot{s}(t) = -\beta \operatorname{sign}(s) - \alpha s, \quad (12)$$

здесь параметры $\alpha > 0, \beta > 0$, которые выбираются из условия возникновения скользящего режима.

Тогда из (12) с учетом (11), можем получить

$$\mathbf{CAx} + \mathbf{CBv} = -\beta \operatorname{sign}(s) - \alpha \mathbf{Cx},$$

отсюда

$$v = -(\mathbf{CB})^{-1} [\mathbf{C}(\alpha \mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{x} + \beta \operatorname{sign}(s)], \quad (13)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица.

Выражение (13) входит в искомое управление (8). Подстановка (13) в исходную систему (7) приводит к системе с линейной динамикой (9), устойчивость которой с учетом (13) анализируют с помощью функции Ляпунова

$$V_k(\mathbf{x}) = 0,5s(\mathbf{x})^2.$$

В системе (9), полученной с учетом (13), выбором значений векторов \mathbf{C} , \mathbf{B} и параметров $\alpha > 0, \beta > 0$ можно обеспечить желаемые устойчивые собственные числа матрицы состояния замкнутой системы (9).

III. ПРИМЕРЫ СИНТЕЗА

A. Модель объекта управления

Рассмотрим модель хаотической системы Арнеодо [5]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2; \\ \dot{x}_2(t) &= x_3; \\ \dot{x}_3(t) &= ax_1 - bx_2 - x_3 - x_1^2. \end{aligned} \quad (14)$$

где x_i – переменные состояния системы; a, b – постоянные параметры. В системе Арнеодо (14) возникает хаотическая динамика при номинальных параметрах $a = 7,5; b = 3,8$.

В задаче управления синхронизацией хаотических систем математическая модель объекта управления с двумя системами Арнеодо включает в себя модель ведущей системы в виде (14) и модель ведомой системы [5]:

$$\begin{aligned}\dot{y}_1(t) &= y_2; \\ \dot{y}_2(t) &= y_3; \\ \dot{y}_3(t) &= ay_1 - by_2 - y_3 - y_1^2 + u,\end{aligned}\quad (15)$$

где y_i – переменные состояния ведомой системы; u – управление.

Вводя новые переменные $e_i(t) = y_i(t) - x_i(t)$, $i = \overline{1,3}$ – ошибки синхронизации, совместную динамику ведущей (14) и ведомой системы (15) представим системой [5]:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1(t) &= e_2; \\ \dot{e}_2(t) &= e_3; \\ \dot{e}_3(t) &= ae_1 - be_2 - e_3 - (y_1 + x_1)e_1 + u.\end{aligned}\quad (16)$$

Тогда для системы (16) ставится задача построения закона управления u , обеспечивающего синхронизацию хаотических систем (14) и (15), т.е. нулевые ошибки синхронизации $e_i(t) = 0$, $i = \overline{1,3}$, и робастность к параметрическим возмущениям, действующим на ведущую систему (14). Т. е. в ведомой системе параметры a, b не изменяются и равны номинальным значениям.

B. Синтез закона с ФСР

На первом этапе синтеза управления для системы (16) задаем инвариантное многообразие вида (2):

$$\psi_1 = \beta_1 |e_1| + \beta_2 |e_2| + |s_1| = 0, \quad (17)$$

где $s_1 = \alpha_{11}e_1 + \alpha_{12}e_2 + e_3 + u_1(e_1, e_2)$.

Подставляя (17) в функциональное уравнение (4), получаем в силу уравнений объекта (16) закон управления:

$$u = -(\beta_1 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \beta_2 e_3 \operatorname{sign} e_2 + \psi_1 / T_1) \operatorname{sign} s_1 - (a - e_1) e_1 - \left(\alpha_{11} - b + \frac{\partial u_1}{\partial e_1} \right) e_2 - \left(\alpha_{12} - 1 + \frac{\partial u_1}{\partial e_2} \right) e_3, \quad (18)$$

Под действием управления (18) ИТ системы (16) попадает в окрестность многообразия (17), движение вдоль которого в силу $s_1 = 0$ описывается декомпозированной системой:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1(t) &= e_2; \\ \dot{e}_2(t) &= -\alpha_{11}e_1 - \alpha_{12}e_2 - u_1(e_1, e_2).\end{aligned}\quad (19)$$

Для нахождения промежуточного управления $u_1(e_1, e_2)$ для системы (19) на втором этапе синтеза аналогично зададим многообразие вида (2):

$$\psi_2 = \beta_3 |e_1| + |s_2| = 0, \quad (20)$$

где $s_2 = \alpha_{21}e_1 + e_2$.

Подставляя это выражение в функциональное уравнение (4), получаем в силу уравнений декомпозированной системы (19) закон «внутреннего» управления:

$$\begin{aligned}u_1(e_1, e_2) &= (\beta_3 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \psi_2 / T_2) \operatorname{sign} s_2 - \\ &\quad - (\alpha_{12} - \alpha_{21}) e_2 - \alpha_{11} e_1.\end{aligned}\quad (21)$$

Таким образом, раскрывая частные производные (21) в (18), получим итоговое выражение для управления.

Движение ИТ системы (19) под действием управления (21) будет описываться уравнением:

$$\dot{e}_1(t) = -\alpha_{21} e_1,$$

которое устойчиво при $\alpha_{21} > 0$, а выбором значения этого параметра можно обеспечить желаемую динамику переходного процесса. К этим условиям добавим условия устойчивости уравнений (4): $T_i > 0$, $i = 1, 2$. Таким образом, условия устойчивости замкнутой системы (16), (18): $\alpha_{21} > 0$, $T_i > 0$, $i = 1, 2$.

Проверим условие возникновения скользящего режима (6) для каждого этапа синтеза. На втором этапе синтеза в (20) входит вторая поверхность переключения $s_2 = \alpha_{21}e_1 + e_2$, тогда ее производная, выраженная из функционального уравнения (4) при многообразии (20), имеет вид

$$\dot{s}_2(t) = -\left(\beta_3 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \frac{1}{T_2} \psi_2 \right) \operatorname{sign} s_2.$$

А условие (6) для второй поверхности скольжения

$$-(\alpha_{21}e_1 + e_2) \left(\beta_3 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \frac{1}{T_2} \psi_2 \right) \operatorname{sign} s_2 < 0$$

выполняется при $\alpha_{21} > 0$, $\beta_3 > 0$, $T_2 > 0$.

Аналогично, с учетом (17) получим выражение поверхности скольжения первого этапа синтеза:

$$\begin{aligned}s_1 &= \alpha_{11}e_1 + \alpha_{12}e_2 + e_3 + u_1(e_1, e_2) = \\ &= e_3 + \left(\beta_3 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \frac{1}{T_1} \psi_1 \right) \operatorname{sign} s_1 + \alpha_{12}e_2,\end{aligned}$$

а из (4) с учетом (17) выразим ее производную

$$\dot{s}_1(t) = -(\beta_1 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \beta_2 e_3 \operatorname{sign} e_2 + \psi_1 / T_1) \operatorname{sign} s_1.$$

Отсюда видно, что условие возникновения скользящего режима (6) для первой поверхности скольжения непосредственно обеспечивается выбором параметров $\alpha_{12} > 0$, $\beta_1 > 0$, $\beta_2 > 0$, $T_1 > 0$.

Итак, анализ выполнения условия возникновения скользящего режима (6) в предложенной методике синтеза закона с ФСР достаточно прост.

C. Синтез классического SMC

Представим систему (16) в виде (7):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ a & -b & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}, \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(y_1 + x_1)e_1 \end{bmatrix}.$$

Тогда выберем $\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 1]^T$. Можно убедиться, что при этом векторе пары матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) управляема, т.к. $\text{rank } \mathbf{U} = [\mathbf{B}; \mathbf{AB}; \mathbf{A}^2\mathbf{B}] = 3$.

Пусть $\mathbf{C} = [c_1 \ c_2 \ c_3]$. Тогда в силу того, что $\mathbf{CB} \neq 0$ и в соответствии с (13) получаем:

$$\nu = -\frac{(\alpha c_1 + ac_3)e_1}{c_3} - \frac{(c_1 + \alpha c_2 - bc_3)e_2}{c_3} - \frac{(c_2 + c_3(\alpha - 1))e_3}{c_3} - \frac{\beta}{c_3} \text{sign}(s),$$

а затем итоговое управление согласно (8) и (10):

$$u = (y_1 + x_1)e_1 - \frac{(\alpha c_1 + ac_3)e_1}{c_3} - \frac{(c_1 + \alpha c_2 - bc_3)e_2}{c_3} - \frac{(c_2 + c_3(\alpha - 1))e_3}{c_3} - \frac{\beta}{c_3} \text{sign}(c_1 e_1 + c_2 e_2 + c_3 e_3). \quad (22)$$

Обеспечить желаемые собственные числа $p_{01} = p_{02} = p_{03} = p_0 < 0$ матрицы состояния системы (9), полученной с учетом (22), можно выбором коэффициентов

$$\alpha = -p_0; c_2 = -2c_1 / p_0; c_3 = c_1 / p_0^2.$$

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании замкнутой системы полагаем, что параметры a, b , входящие в законы управления (18), (22) и ведомую систему (15), неизменны и равны номинальным $a_0 = 7,5; b_0 = 3,8$. А параметры ведущей системы (14) изменяются следующим образом:

$$a = \begin{cases} a_0, & t \leq 20; \\ 1,5a_0, & t > 20; \end{cases} \quad b = \begin{cases} b_0, & t \leq 20; \\ 1,5b_0, & t > 20. \end{cases} \quad (23)$$

Моделирование замкнутой системы производилось в Matlab R2021a с начальными условиями: $x_1(0) = 3; x_2(0) = 2; x_3(0) = 2; y_1(0) = 1; y_2(0) = -1; y_3(0) = 7$. Параметры закона (18): $T_1 = T_2 = 0,1; \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1; \alpha_{11} = 3,8; \alpha_{12} = 1; \alpha_{21} = 40; A = 20$; параметры закона (22): $p_0 = -10; c_1 = 10; \beta = 0,5$.

На рис. 1–5 показаны результаты моделирования системы (16) при наличии параметрических возмущений (23): с законом управления (18) линии красного цвета, с законом управления (22) – черного цвета. Параметры законов подобраны так, чтобы замкнутая система имела достаточно близкие динамические характеристики переходных процессов и амплитуды управлений.

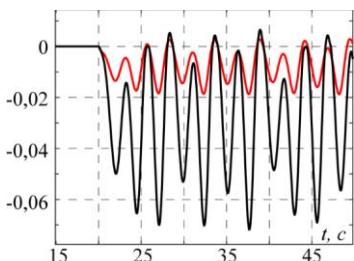


Рис. 1. Графики изменения $e_1(t)$

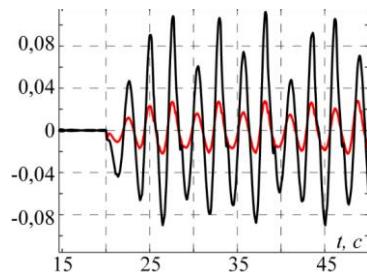


Рис. 2. Графики изменения $e_2(t)$

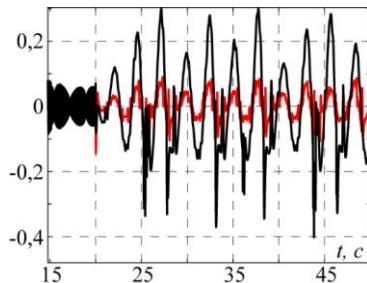


Рис. 3. Графики изменения $e_3(t)$

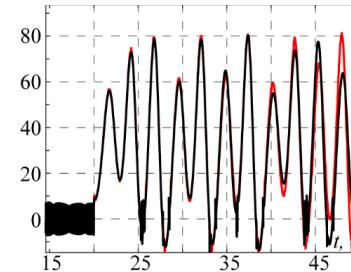


Рис. 4. Графики изменения управлений

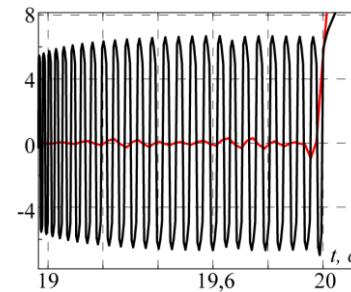


Рис. 5. Графики изменения управлений (фрагмент в увеличенном масштабе)

На рис. 6 показана фазовая траектория системы (16) с законом управления (18) и поверхностью скольжения (17), а на рис. 7 – фазовая траектория декомпозированной системы (19) с законом управления (21) и поверхностью скольжения (20).

Из представленных результатов моделирования видно, что закон управления с ФСР (18) в сравнении с законом (22), при схожем быстродействии и амплитуде управления, обеспечивает

- более точную синхронизацию при параметрических возмущениях (23), что наглядно видно из сравнения рис. 1–3: амплитуды ошибок синхронизации в 3–5 раз меньше;

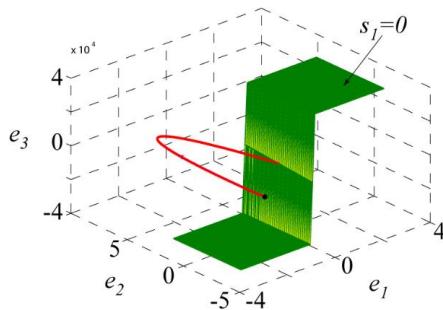


Рис. 6. Фазовая траектория

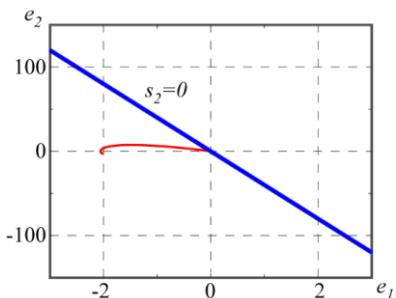


Рис. 7. Фазовая траектория

- отсутствие chattering эффекта: рассматривая изменения графиков управлений рис. 4 при увеличенном масштабе (рис. 5), можно увидеть, что закон управления (22), до момента возникновения возмущения, представляет собой высокочастотное переключение сигнала управления с амплитудой $\pm 6,5$, а закон управления (18) – незначительные нерегулярные изменения в интервале $\pm 0,5$. Это говорит о том, что закон управления (18) в меньшей степени энергозатратен.

Рис. 6 и 7 иллюстрируют разные этапы движения ИТ системы (16) при движении к соответствующим поверхностям скольжения. Как видим, ИТ устремляется в малую окрестность начала координат, соответствующую цели управления – $e_i(t) = 0$, $i = \overline{1,3}$ при обеспечении робастности к параметрическим возмущениям (23).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено сравнение закона управления с ФСР СТУ с классическим законом скользящего управления в задаче обеспечения робастности при синхронизации двух хаотических систем Арнеодо в условиях действия параметрических возмущений. Поставленная в работе цель достигнута, а преимущества предложенного закона управления (18) наглядно продемонстрированы.

Обобщая полученные результаты, необходимо отметить следующие преимущества предложенного подхода к синтезу SMC:

- компенсация параметрических возмущений без синтеза наблюдателей возмущений;
- возможность исключить chattering эффект без потери свойства робастности;
- в общем случае поверхность скольжения задается неявно, т. к. может содержать неизвестную функ-

цию $u_k(\mathbf{x}_k)$. В то время как поверхности скольжения классического метода всегда задаются явно, как правило, в виде линейной комбинации переменных состояния (или ошибок);

- более простой анализ устойчивости замкнутой системы, т. к. анализ сводится к анализу устойчивости финишной декомпозированной системы, как правило, существенно меньшей размерности, и анализу устойчивости функциональных уравнений (4). В классическом методе анализируется устойчивость замкнутой системы исходной размерности.

Представленный в работе подход позволит по-новому подойти к синтезу робастных законов управления хаотическими системами с учетом идей направленной самоорганизации и робастного управления.

В части развития данной работы будет продолжено сравнение полученных результатов с другими методами современной теории управления и применение данного подхода к другим хаотическим системам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Pecora L.M., Carroll T.L. Synchronization in chaotic systems // Physical Review Letters. – 1990. – Vol. 64, Iss. 8. – P. 821-824.
- Boccaletti S., Kurths J., Osipov G. [et al.]. The synchronization of chaotic systems // Physics Reports-Review Section of Physics Letters. – 2002. – Vol. 366, Iss. 1–2. – P. 1-101.
- Agiza H.N., Yassen M.T. Synchronization of Rossler and Chen chaotic dynamical systems using active control // Physics Letters A. – 2001. – Vol. 278, Iss. 4. – P. 191-197.
- Arneodo A., Coullet P., Tresser C. Occurrence of strange attractors in three-dimensional Volterra equations // Phy. Lett. A. – 1980. – Vol. 79. – P. 259-263.
- Sundarapandian V. Adaptive backstepping controller and synchronizer design for Arneodo chaotic system with unknown parameters // International Journal of Computer Science & Information Technology. – 2012. – Vol. 4, nr 6. – P. 143-157.
- Chen H.-K. Global chaos synchronization of new chaotic systems via nonlinear control // Chaos, Solitons and Fractals. – 2005. – Vol. 23, Iss. 4. – P. 1245-1251.
- Feki M. An adaptive chaos synchronization scheme applied to secure communication // Chaos, Solitons and Fractals. – 2003. – Vol. 18, Iss. 1. – P. 141-148.
- Yu X., Zhihong M. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. – 2002. – Vol. 49, Iss. 2. – P. 261-264.
- Tan, X., Zhang J., Yang Y. Synchronizing chaotic systems using backstepping design // Chaos, Solitons and Fractals. – 2003. – Vol. 16, Iss. 1. – P. 37-45.
- Kapitaniak T. Continuous control and synchronization in chaotic systems // Chaos, Solitons and Fractals. 1995. – Vol. 6, nr C. – P. 237-244.
- Cuomo K.M., Oppenheim A.V. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications // Physical Review Letters. – 1993. – Vol. 71, nr 1. – P. 65-68.
- Kocarev L., Parlitz U. General approach for chaotic synchronization with applications to communication // Physical Review Letters. – 1995. – Vol. 74, nr 25. – P. 5028-5031.
- Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I. Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic system // Physical Review E. – 1995. – Vol. 51, nr 2. – P. 980-994.
- Bai E.-W., Lonngren K.E. Synchronization and control of chaotic systems // Chaos, solitons and fractals. 1999. – Vol. 10, nr 9. – P. 1571-1575.
- Yau H.T. Design of adaptive sliding mode controller for chaos synchronization with uncertainties // Chaos, Solitons and Fractals. – 2004. – Vol. 22, nr 2. – P. 341-347.

16. *Laghrouche S., Plestan F., Glumineau A.* Higher order sliding mode control based on integral sliding mode // Automatica. – 2007. – Vol. 43. – P. 531-537.
17. *Sundarapandian V., Volos C.K., Pham V.-T.* Global chaos control of a novel nine-term chaotic system via sliding mode control // Studies in Computational Intelligence. – 2015. – Vol. 576. – P. 571-590.
18. *Lu J.G.* Chaotic dynamics and synchronization of fractional-order Arneodo's systems // Chaos, Solitons and Fractals. – 2005. – Vol. 26, Iss. 4. – P. 1125-1133.
19. *Hua C., Guan X., Shi P.* Adaptive feedback control for a class of chaotic systems // Chaos, Solitons and Fractals. – 2005. – Vol. 23, Iss. 3. – P. 757-765.
20. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ; Москва: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с. – ISBN 5-230-24678-2.
21. *Кузьменко А.А.* Нелинейное робастное управление возбуждением синхронного генератора: синергетическая система с переменной структурой // Информатика и системы управления. – 2014. – Т. 3, № 41. – С. 130-139.
22. *Колесников А.А., Кузьменко А.А.* Синтез законов разрывного управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий метода АКАР / // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2019. – Т. 20, № 8. – С. 451-460.
23. *Кузьменко А.А.* Использование форсированного скользящего режима для управления синхронным двигателем с постоянными магнитами // Математическая теория управления и ее приложения: материалы конференции, г. Санкт-Петербург, 7–8 октября 2020 г. – СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. – С. 176-181.
24. *Kuz'menko A.A.* Forced sliding mode control: Synergetic approach // IEEE 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2020): proceedings; Russia, Lipetsk, 11–13 Nov. 2020.
25. *Кузьменко А.А.* Использование управления с форсированным скользящим режимом для синхронизации хаотических систем // Информатика и системы управления. – 2021. – № 1 (67). – С. 101-113.
26. *Utkin V., Guldner J., Shi J.* Sliding Mode Control in Electromechanical Systems. – 2nd ed. – Boca Raton; London; New York: CRC Press, Taylor and Francis, 2009. – 503 p. – ISBN 978-1-4200-6560-2.

Комбинированный метод синергетического синтеза законов управления пространственным движением БПЛА с жестким крылом в условиях ветровых возмущений

Веселов Геннадий Евгеньевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
gev@sfedu.ru

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

Аннотация. В данной работе предлагается метод синергетического синтеза законов управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) с жестким крылом для продольного и бокового движения в условиях ветровых возмущений. Основной целью данной работы является проведение исследование поведения БПЛА с синтезированными синергетическими законами управления продольным и боковым движением при их совместном действии. Эффективность предлагаемого подхода к синергетическому синтезу стратегий управления подтверждается результатами компьютерного моделирования. Разработанные программные продукты позволяют осуществлять синтез и моделирование замкнутых систем управления БПЛА в соответствии с предложенной процедурой метода синергетического синтеза законов управления пространственным движением БПЛА при разделении задач продольного и бокового движения в условиях ветровых возмущений.

Annotation. This paper proposes a synergetic synthesis method for the control laws of fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV) for longitudinal and lateral motion in the presence of wind disturbances. The main purpose of this work is to study the behavior of UAV with synthesized synergetic control laws of longitudinal and lateral motion when they are combined together. The effectiveness of the proposed approach to the synergetic synthesis of control strategies is proved by the results of computer modeling. The developed software allows the synthesis and modeling of closed-loop UAV control systems in accordance with the proposed procedure of the method of synergetic synthesis of the control laws of longitudinal and lateral motion of UAV under the influence of wind disturbances.

Ключевые слова: БПЛА с жёстким крылом; продольное движение; боковое движение; нелинейное управление; синергетическая теория управления; ветровые возмущения; инвариантное многообразие.

Keywords: Fixed-wing UAV; longitudinal motion; lateral motion; nonlinear control; synergetic control theory; wind disturbances; invariant manifold.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается бурное развитие применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с жестким крылом в гражданской сфере. Данный тип БПЛА отличается по техническим характеристикам от других сопоставимым по массогабаритным размерам типов БПЛА тем, что БПЛА с жестким крылом способны совершать автономные полеты более длительное время, они могут осуществлять полеты на большей высоте и с большей скоростью. За счет этого они находят применение при обследовании территорий [1] и доставки небольших грузов [2] в труднодоступные районы. БПЛА с жестким крылом находят все большее применение в научных исследованиях и разведке, агропромышленном комплексе, мониторинге природы, освещении спортивных и развлекательных мероприятий, [3–5] и т.д.

Одним из главных факторов, ограничивающих применение БПЛА с жестким крылом, является сильный ветер, поскольку он может оказать такое влияние на БПЛА, которое приведет к существенным отклонениям от желаемых траекторий движения, что, в свою очередь, может привести к нештатным ситуациям и авариям [6–10]. Следует отметить, что для того чтобы иметь возможность осуществлять выполнение технологической задачи в ветреную погоду, необходимо при синтезе законов управления БПЛА с жестким крылом учитывать влияние ветровых возмущений. Таким образом, одной из важнейших научно-технических задач, решаемых при проектировании систем управления движения автономных БПЛА является задача синтеза законов управления, обеспечивающих максимальную область устойчивого движения по заданному маршруту в условиях действия ветровых возмущений. Очевидно, что решение такой задачи возможно при применении методов синтеза управляющих воздействий, максимально учитывающих нелинейные свойства математических моделей пространственного движения, обеспечивающие асимптотически устойчивое движение БПЛА с жестким крылом и инвариантное поведение к действию ветровых возмущений.

Нелинейные методы управления, разработанные для рассматриваемого класса систем, включают метод бэкстеппинг – Backstepping [11, 12], нелинейные управление с прогнозирующей моделью – Nonlinear model predictive control [13, 14], управление со скользящим режимом – Sliding mode control [15, 16], Nested saturation control [17, 18], нечеткое управление – Fuzzy logic control [19], –управление – H-infinity control [20, 21], динамическая инверсия – Dynamic inversion [22, 23], адаптивное управление – Adaptive control [24] и метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [25, 26].

Проведенный обзор существующих подходов к синтезу автопилотов БПЛА позволил выделить их основные особенности, а также достоинства и недостатки, которые представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА

Метод	Достоинства	Недостатки
Линейное управление	Простота процедур синтеза. Низкие вычислительные затраты.	Синтез осуществляется по линейным моделям. Не гарантируется устойчивость системы при больших отклонениях. Не учет нелинейных связей приводит к неэффективному управлению.
Бэкстеппинг	Допускается использование моделей с неопределенностью. Гарантируется асимптотическая устойчивость замкнутых систем.	Предполагает измерение полного вектора состояния системы. Отсутствие ограничений на управляющие воздействия. Отсутствует возможность синтеза векторных законов управления.
Управление со скользящим режимом	Адаптация к действию внешних возмущений и робастность. Простая структура. Гарантирование устойчивости.	Существенное влияние скользящего режима на точность управления и стабильность системы
Адаптивное управление	Адаптация к действию внешних и внутренних возмущений	Эффективность синтезируемых систем только к влиянию параметрической неопределенности Как правило требуется проведения дополнительных настроек регуляторов
Нечёткое управление	Возможность применения для систем с неопределенностями.	Не гарантирует высокой точности систем управления и необходимых динамических показателей качества.
Метод АКАР	Полный учет нелинейностей модели. Возможность проектирования векторных систем управления. Аналитичность всех процедур синтеза. Гарантирование асимптотической устойчивости во всей	Вычислительная сложность алгоритмов управления

Метод	Достоинства	Недостатки
	допустимой области изменения фазовых координат системы. Робастность и адаптивность проектируемых систем. Синтез наблюдателей состояния, возмущения и параметров системы.	

Таким образом, представленный обзор методов показывает, что наиболее оптимальным с точки зрения проектирования систем управления, гарантирующих асимптотически устойчивое поведение синтезируемых систем, а также учета нелинейных свойств объекта, возможности проектирования согласованного векторного управления является метод АКАР. В данной работе рассматривается исследование системы пространственного движения БПЛА с жестким крылом при взаимодействии систем управления продольным и боковым движением и также в работе предлагается применение теории и методов синергетической теории управления (СТУ) [27, 28] к задаче синтеза систем управления для БПЛА с жестким крылом в условиях ветровых возмущений. Достоинством данного подхода состоит в том, что он позволяет значительно улучшить процедуру синтеза за счет учета нелинейности поведения БПЛА и ветровых возмущений.

II. СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ БПЛА В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

A. Математическая модель БПЛА

Пусть $V_k, \theta, \omega_z, x, H, \vartheta \in R^6$ – это будет вектор пространства состояний БПЛА, где V_k – аэродинамическая скорость; θ – угол наклона траектории; ω_z – угловая скорость тангенса вокруг оси z ; x – дальность полета; H – высота полета; ϑ – угол тангенса и пусть $(P, \delta_B) \in R^2$ вектор управляющих воздействий, в который входят P – сила тяги и δ_B – угол отклонения руля высоты. То есть при управлении БПЛА в продольной плоскости воздействовать на его перемещение мы можем, изменяя силу тяги и угол отклонения руля высоты.

Уравнения математическая модель продольного движения БПЛА имеют следующую форму [29]:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\varphi + \vartheta - \theta) + \frac{qS}{m} \\ &\quad (c_x \cos(\vartheta - \theta) - c_y \sin(\vartheta - \theta)) - W_k; \\ \dot{\theta}(t) &= -\frac{g}{V_k} \cos \theta + \frac{P}{m V_k} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \frac{qS}{m V_k} \\ &\quad (c_x \sin(\vartheta - \theta) + c_y \cos(\vartheta - \theta)) - W_\theta; \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{q S b_A}{I_z} m_z; \\ \dot{x}(t) &= V_k \cos \theta \cos \Psi^*; \\ \dot{H}(t) &= V_k \sin \theta; \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где Ψ – текущее значение путевого угла; c_x, c_y – коэффициенты аэродинамических сил; m – масса самолета; I_z – момент инерции; S – площадь крыла; q – скоростной напор; b_A – средняя аэродинамическая хорда крыла и W_k, W_θ – проекции ветровых возмущений.

Дополним модель (1) выражениями для аэродинамических сил c_x, c_y и момента m_z :

$$\begin{aligned} c_x &= c_x^0 + c_x^\alpha \alpha + c_x^{\delta_B} \delta_B; \\ c_y &= c_y^0 + c_y^\alpha \alpha + c_y^{\delta_B} \delta_B; \\ m_z &= m_z^\alpha \alpha + \frac{l}{V_k} m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\alpha = \vartheta - \theta. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) математическая модель продольного движения (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{qS}{m} \left[\begin{aligned} &\left[c_x^0 + c_x^\alpha (\vartheta - \theta) + c_x^{\delta_B} \delta_B \right] \cos(\vartheta - \theta) - \\ &- \left[c_y^0 + c_y^\alpha (\vartheta - \theta) + c_y^{\delta_B} \delta_B \right] \sin(\vartheta - \theta) \end{aligned} \right] - W_k; \\ \dot{\vartheta}(t) &= -\frac{g}{V_k} \cos \theta + \frac{P}{m V_k} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{qS}{m V_k} \left[\begin{aligned} &\left[c_x^0 + c_x^\alpha (\vartheta - \theta) + c_x^{\delta_B} \delta_B \right] \sin(\vartheta - \theta) + \\ &+ \left[c_y^0 + c_y^\alpha (\vartheta - \theta) + c_y^{\delta_B} \delta_B \right] \cos(\vartheta - \theta) \end{aligned} \right] - W_\theta; \quad (4) \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{qSb_A}{I_z} \left[m_z^\alpha (\vartheta - \theta) + \frac{l}{V_k} m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B \right]; \\ \dot{x}(t) &= V_k \cos \theta \cos \Psi^*; \\ \dot{H}(t) &= V_k \sin \theta; \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z. \end{aligned}$$

В соответствии с процедурой метода АКАР определим технологические инварианты синтезируемой системы. Очевидно, что в качестве первой цели можно рассматривать стабилизацию скорости движения БПЛА V_k .

В качестве второй цели управления потребуем стабилизацию высоты полета H :

$$\begin{aligned} V_k &= V_k^0; \\ H &= H^0, \end{aligned} \quad (5)$$

где V_k^0 – требуемое значение курсовой скорости движения БПЛА, H^0 – необходимая высота полета.

На динамику БПЛА значительное влияние оказывают ветровые возмущения. Поэтому необходимо, чтобы синтезируемая система управления БПЛА с замкнутым контуром была инвариантной к действию этих возмущений. В соответствии с процедурой интегральной адаптации на инвариантных многообразиях [30, 31] в пространство состояний системы управления вводятся дополнительные переменные состояния [32]. Для системы управления БПЛА при продольном движении мы можем ввести

две дополнительных переменных состояния системы управления z_1 и z_2 . Тогда, в соответствии с процедурой расчета, математическая модель синергетического синтеза запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k(t) &= -g \sin \theta + \frac{P}{m} \cos(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{qS}{m} \left[\begin{aligned} &\left[c_x^0 + c_x^\alpha (\vartheta - \theta) + c_x^{\delta_B} \delta_B \right] \cos(\vartheta - \theta) - \\ &- \left[c_y^0 + c_y^\alpha (\vartheta - \theta) + c_y^{\delta_B} \delta_B \right] \sin(\vartheta - \theta) \end{aligned} \right] + z_1; \\ \dot{\vartheta}(t) &= -\frac{g}{V_k} \cos \theta + \frac{P}{m V_k} \sin(\varphi + \vartheta - \theta) + \\ &+ \frac{qS}{m V_k} \left[\begin{aligned} &\left[c_x^0 + c_x^\alpha (\vartheta - \theta) + c_x^{\delta_B} \delta_B \right] \sin(\vartheta - \theta) + \\ &+ \left[c_y^0 + c_y^\alpha (\vartheta - \theta) + c_y^{\delta_B} \delta_B \right] \cos(\vartheta - \theta) \end{aligned} \right] + z_2; \quad (6) \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{qSb_A}{I_z} \left[m_z^\alpha (\vartheta - \theta) + \frac{l}{V_k} m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_B} \delta_B \right]; \\ \dot{x}(t) &= V_k \cos \theta \cos \Psi^*; \\ \dot{H}(t) &= V_k \sin \theta; \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z; \\ \dot{z}_1(t) &= \eta_1 (V_k^0 - V_k); \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2 (H^0 - H). \end{aligned}$$

где η_1, η_2 – постоянные коэффициенты, отражающие динамику внутренних переменных состояния системы управления.

B. Процедура синтеза системы управления

Очевидно, что на первом этапе синтеза мы можем обеспечить стабилизацию курсовой скорости БПЛА. Тогда рассмотрим первую совокупность макропеременных:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= V_k^0 - V_k - z_1; \\ \Psi_2 &= \sin \theta - \varphi_1, \end{aligned} \quad (7)$$

удовлетворяющую решению $\Psi_i = 0$, $i = 1, 2$ системы основных функциональных уравнений:

$$T_i \dot{\Psi}_i(t) + \Psi_i = 0; \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

где T_1, T_2 – это постоянные времени; φ_1 – внутреннее управляющее воздействие.

При попадании изображающей точки замкнутой системы в окрестность пересечения инвариантных многообразий $\Psi_i = 0$, $i = 1, 2$ в системе будут гарантированно выполняться следующие соотношения:

$$\begin{aligned} V_k &= V_k^0 - z_1; \\ \sin \theta &= \varphi_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Следовательно, в замкнутой системе осуществляется динамическое сжатие фазового пространства, в результате чего поведение замкнутой системы в окрестности пересечения инвариантных многообразий $\Psi_i = 0$ будет описываться декомпозированной системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{\omega}_z(t) = \frac{qSb_A}{I_z} \left(m_z^\alpha (\vartheta - \arcsin \varphi_1) + \frac{l}{V_k^0 - z_1} m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_\theta} \delta_B \right);$$

$$\dot{x}(t) = (V_k^0 - z_1) \sqrt{1 - \varphi_1^2} \cos \Psi^*;$$

$$\dot{H}(t) = (V_k^0 - z_1) \varphi_1;$$

$$\dot{\vartheta}(t) = \omega_z;$$

$$\dot{z}_1(t) = \eta_1 z_1;$$

$$\dot{z}_2(t) = \eta_2 (H^0 - H).$$

На втором этапе синтеза мы можем ввести в рассмотрение второй технологический инвариант – стабилизацию высоты полета БПЛА. Тогда для декомпозированной системы (10) рассмотрим следующую макропараметру:

$$\Psi_3 = H^0 - H - z_2, \quad (11)$$

которая должна удовлетворять решению $\dot{\Psi}_3 = 0$ функционального уравнения

$$T_3 \dot{\Psi}_3(t) + \Psi_3 = 0. \quad (12)$$

Из совместного решения систем (11) и (12), с учетом декомпозированной модели (10), определяется выражение для внутреннего управляемого воздействия:

$$\varphi_1 = \frac{(H^0 - H)(T_3 \eta_2 - 1) + z_2}{T_3(z_1 - V_k^0)}. \quad (13)$$

C. Компьютерное моделирование

При моделировании синтезированной замкнутой системы управления БПЛА параметры объекта управления соответствуют значениям: $m = 56,3 \text{ кг}$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $I_z = 31,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $l = 2,707 \text{ м}$, $S = 1,05 \text{ м}^2$, $q = 679 \text{ кг/м}^2$, $b_A = 0,35 \text{ м}$, $c_x^0 = -0,0508 \text{ м/с}^2$, $c_x^\alpha = 0,002 \text{ м/с}^2$, $c_x^{\delta_B} = 0,0006 \text{ м/с}^2$, $c_y^0 = -0,0704 \text{ м/с}^2$, $c_y^\alpha = 5,0013 \text{ м/с}^2$, $c_y^{\delta_B} = 5,0057 \text{ м/с}^2$, $m_z^\alpha = -0,0051 \text{ м/с}^2$, $m_z^{\delta_B} = 0,00591 \text{ м/с}^2$, $m_z^{\omega_z} = -16,0505 \text{ м/с}^2$

а параметры системы управления были заданы в следующем виде: $T_1 = 1,5$, $T_2 = 1,5$, $T_3 = 0,2$, $\eta_1 = -0,05$, $\eta_2 = -0,005$, и целевые значения технологических инвариантов: $H^0 = 200 \text{ м}$, $V_k^0 = 80 \text{ м/с}$.

Моделирование замкнутой системы было проведено при изменяющихся ветровых возмущениях, действующих на БПЛА. На рис. 1, 2 представлены значения проекций силы ветра W_k, W_θ для различных значений временных интервалов.

На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования синтезированной системы управления БПЛА в условиях действия неизмеряемых ветровых возмущений.

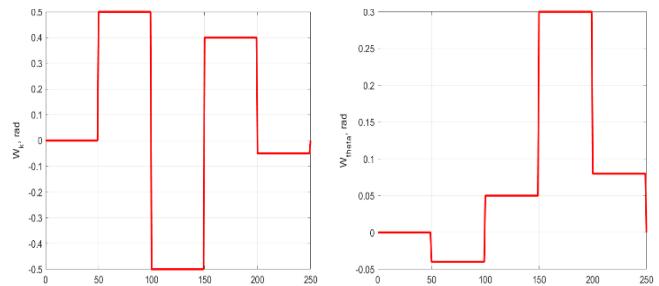


Рис. 1. Изменение проекции силы ветра W_k

Рис. 2. Изменение проекции силы ветра W_θ

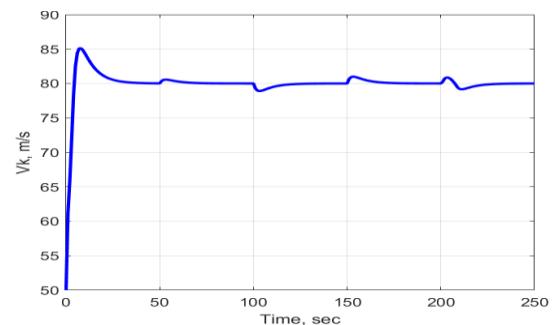


Рис. 3. Переходной процесс относительно курсовой скорости V_k

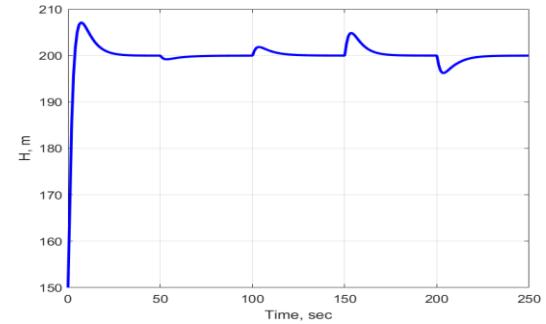


Рис. 4. Переходной процесс относительно высоты полета H

Из представленных результатов моделирования синтезированной замкнутой системы управления БПЛА при продольном движении можно сделать выводы, что в системе обеспечивается выполнение введенных технологических инвариантов, а также обеспечивается асимптотически устойчивое поведение. Синтезированная система управления обеспечивает подавление влияния внешних неизмеряемых возмущающих воздействий, гарантирует стабилизацию требуемых переменных состояния – курсовой скорости и высоты полета БПЛА.

III. СИНЭРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ БОКОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ БПЛА В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

A. Математическая модель БПЛА

Перейдем к рассмотрению модели движения БПЛА в боковой плоскости.

Пусть $(\Psi, \omega_x, \omega_y, z, \gamma, \psi) \in \mathbb{D}^6$ – это будет вектор пространства состояний БПЛА при боковом движении, где Ψ – угол пути; $\omega_x = \dot{\gamma}$ – угловая скорость крена;

$\omega_y = \dot{\psi}$ – угловая скорость рыскания; z – боковое смещение; а $(\delta_s, \delta_h) \in \mathbb{D}^2$ – вектор управляющих воздействий, в который входят δ_s – угол отклонения элерона и δ_h – угол отклонения руля направления.

С учетом действия на БПЛА ветровых возмущений и с учетом значений коэффициентов аэродинамических сил и моментов [29] запишем математическую модель в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}(t) &= \frac{P^* \cos \varphi + qS(c_x^0 + c_x^{\delta_s} \delta_s^*)}{mV_k^*} \sin(\psi - \Psi) - \\ &- \frac{P^* \sin \varphi + qS(c_y^0 + c_y^{\delta_s} \delta_s^*)}{mV_k^*} \cos(\psi - \Psi) \gamma + \\ &+ \frac{qS(c_z^\beta (\psi - \Psi) + c_z^{\delta_h} \delta_h)}{mV_k^*} (\cos(\psi - \Psi) - \sin(\psi - \Psi) \gamma) - W_{ps}; \\ \dot{\omega}_x(t) &= \frac{qSI}{I_x} \left(m_x^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_x^{\omega_x} \omega_x + m_x^{\omega_y} \omega_y) + m_x^{\delta_s} \delta_s + m_x^{\delta_h} \delta_h \right) + \\ &+ \frac{I_z - I_y}{I_x} \omega_y^2 \gamma; \\ \dot{\omega}_y(t) &= \frac{qSI}{I_y} \left(m_y^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_y^{\omega_x} \omega_x + m_y^{\omega_y} \omega_y) + m_y^{\delta_s} \delta_s + m_y^{\delta_h} \delta_h \right) + \\ &+ \frac{I_x - I_z}{I_y} \omega_x \omega_y \gamma; \\ \dot{z}(t) &= -V_k^* \sin \Psi; \\ \dot{\gamma}(t) &= \omega_x; \\ \dot{\psi}(t) &= \omega_y.\end{aligned}\quad (14)$$

где W_{ps} – проекция ветрового возмущения, P^* – фиксированное значение силы тяги двигателя БПЛА, $\delta_s^* = \delta_h^*$ – угол поворота руля высоты БПЛА при боковом движении остается неизменным,

В соответствии с процедурой интегральной адаптации на инвариантных многообразиях, определим цели управления для БПЛА при боковом перемещении. Так как у БПЛА при боковом движении имеется два канала управления: δ_s и δ_h , то мы можем определить два инварианта, которые должны будут выполняться в замкнутой системе. Исходя из технологических требований, предъявляемых к движению БПЛА в боковой плоскости, в процессе этого движения необходимо обеспечивать стабилизацию угла пути БПЛА Ψ и угла крена γ . Тогда совокупность технологических инвариантов для БПЛА при боковом движении записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Psi &= \Psi^0; \\ \gamma &= \gamma_0.\end{aligned}\quad (15)$$

В соответствии с процедурой метода интегральной адаптации на инвариантных многообразиях, составим модель синергетического синтеза. В данном случае в рассмотрение вводятся две дополнительные переменные состояния регуляторов z_1, z_2 , которые являются опре-

ленной оценкой действия ветровых и других возмущений, оказывающих воздействие на БПЛА, а также параметрических возмущений модели БПЛА. Тогда расширенная модель синергетического синтеза для БПЛА при боковом движении записывается как:

$$\begin{aligned}\dot{\Psi}(t) &= \frac{P^* \cos \varphi + qS(c_x^0 + c_x^{\delta_s} \delta_s^*)}{mV_k^*} \sin(\psi - \Psi) - \\ &- \frac{P^* \sin \varphi + qS(c_y^0 + c_y^{\delta_s} \delta_s^*)}{mV_k^*} \cos(\psi - \Psi) \gamma + \\ &+ \frac{qS(c_z^\beta (\psi - \Psi) + c_z^{\delta_h} \delta_h)}{mV_k^*} (\cos(\psi - \Psi) - \sin(\psi - \Psi) \gamma) - z_1; \\ \dot{\omega}_x(t) &= \frac{qSI}{I_x} \left(m_x^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_x^{\omega_x} \omega_x + m_x^{\omega_y} \omega_y) + m_x^{\delta_s} \delta_s + m_x^{\delta_h} \delta_h \right) + \\ &+ \frac{I_z - I_y}{I_x} \omega_y^2 \gamma; \\ \dot{\omega}_y(t) &= \frac{qSI}{I_y} \left(m_y^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_y^{\omega_x} \omega_x + m_y^{\omega_y} \omega_y) + m_y^{\delta_s} \delta_s + m_y^{\delta_h} \delta_h \right) + \\ &+ \frac{I_x - I_z}{I_y} \omega_x \omega_y \gamma; \\ \dot{z}(t) &= -V_k^* \sin \Psi; \\ \dot{\gamma}(t) &= \omega_x; \\ \dot{\psi}(t) &= \omega_y; \\ \dot{z}_1(t) &= \eta_1 (\Psi^0 - \Psi); \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2 (\gamma_0 - \gamma),\end{aligned}\quad (16)$$

где η_1, η_2 – постоянные коэффициенты, отражающие динамику переменных состояния z_1, z_2 .

B. Процедура синтеза системы управления

На первом этапе синергетического синтеза вводится первый набор макропараметров, учитывающий первый технологический инвариант (15):

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= \Psi^0 - \Psi - z_1; \\ \Psi_2 &= \omega_x - \varphi_1,\end{aligned}\quad (17)$$

при этом совокупность макропараметров (17) должна удовлетворять решению $\Psi_i = 0$, $i = 1, 2$ системы основных функциональных уравнений:

$$T_i \dot{\Psi}_i(t) + \Psi_i = 0, \quad i = 1, 2, \quad (18)$$

где T_1, T_2 – постоянные времени; φ_1 – внутреннее управляющее воздействие.

В соответствии с принципом расширения-сжатия фазового пространства, при попадании под влиянием синтезируемых управляющих воздействий изображающей точки замкнутой системы в окрестность пересечения инвариантных многообразий $\Psi_i = 0$, $i = 1, 2$ в системе происходит динамическая декомпозиция. Следовательно, в системе будут гарантированно соблюдаться следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\Psi &= \Psi^0 - z_1; \\ \omega_x &= \varphi_1.\end{aligned}\quad (19)$$

С учетом выражений (19) поведение замкнутой системы в окрестности пересечения инвариантных многообразий $\Psi_i = 0$, $i = 1, 2$ описывается декомпозированной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_y(t) &= \frac{qSL}{I_y} \left(m_y^\beta (\psi - \Psi) + \frac{l}{2V_k^*} (m_x^{\omega_x} \varphi_1 + m_y^{\omega_y} \omega_y) + m_y^{\delta_x} \delta_x + m_y^{\delta_u} \delta_u \right) + \\ &+ \frac{I_x - I_z}{I_y} \varphi_1 \omega_y \gamma; \\ \dot{z}(t) &= -V_k^* \sin(\Psi^0 - z); \\ \dot{\gamma}(t) &= \varphi_1; \\ \dot{\psi}(t) &= \omega_y; \\ \dot{z}_1(t) &= \eta_1 z_1; \\ \dot{z}_2(t) &= \eta_2 (\gamma_0 - \gamma), \end{aligned} \quad (20)$$

На втором этапе синтеза для декомпозированной системы (22) вводим макропеременную

$$\Psi_3 = \gamma_0 - \gamma - z_2 \quad (21)$$

которая должна удовлетворять решению $\Psi_3 = 0$ функционального уравнения

$$T_3 \dot{\Psi}_3(t) + \Psi_3 = 0. \quad (22)$$

Из совместного решения (21) и (22) с учетом декомпозированной модели (20) определяется выражение для внутреннего управления:

$$\varphi_1 = -\frac{(T_3 \eta_2 - 1)(\gamma_0 - \gamma) + z_2}{T_3}. \quad (23)$$

C. Компьютерное моделирование

При компьютерном моделировании были приняты параметры системы управления боковым движением: $T_1 = T_2 = 3$, $T_3 = 0,1$, $\eta_1 = \eta_2 = -1$, $c_z^\beta = 0,013 \text{ м/c}^2$, $c_z^{\delta_u} = -3,033 \text{ м/c}^2$, $m_x^\beta = -0,002 \text{ м/c}^2$, $m_x^{\omega_x} = -0,38 \text{ м/c}^2$, $m_x^{\omega_y} = -0,5013 \text{ м/c}^2$, $m_x^{\delta_x} = -0,004 \text{ м/c}^2$, $m_y^\beta = 0,0018 \text{ м/c}^2$, $m_y^{\delta_u} = -0,009 \text{ м/c}^2$, $m_y^{\omega_y} = 0,0921 \text{ м/c}^2$, $m_y^{\delta_x} = 2,009 \text{ м/c}^2$

значение переменных и управляющих воздействий подсистемы продольного движения: $V_k^* = 50 \text{ м/с}$; $\theta = 0 \text{ рад}$, $\vartheta = 0 \text{ рад}$, $P^* = 350 \text{ Н}$, $\delta_e^* = 0,5 \text{ рад}$, и целевые значения технологических инвариантов: $\Psi^0 = 0,09$; $\gamma_0 = 0$.

Исследование системы проводим при условии действия на систему внешнего неизмеряемого ветрового возмущения. На рис. 5 представлен график проекции силы ветра в направлении отклонения от угла пути.

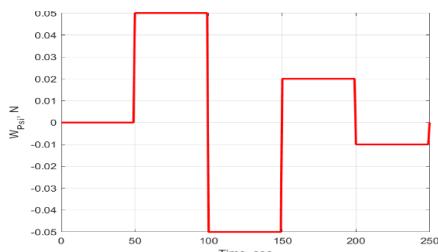


Рис. 5. Изменение проекции силы ветра Ψ

На рис. 6, 7 представлены результаты моделирования синтезированной системы управления БПЛА с жестким крылом в условиях действия неизмеряемых ветровых возмущений.

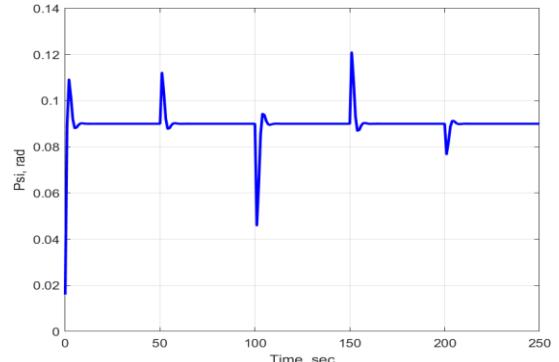


Рис. 6. Переходный процесс относительно угла пути Ψ

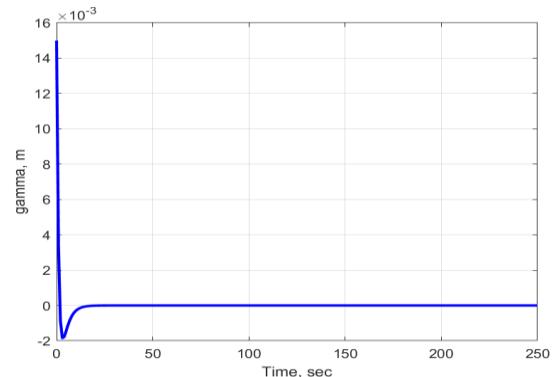


Рис. 7. Переходной процесс относительно угла крена γ

Синтезированная система управления обеспечивает подавление влияния внешних неизмеряемых возмущающих воздействий, гарантирует стабилизацию требуемых переменных состояния – курсовой скорости и высоты полета БПЛА.

IV. СИСТЕМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ БПЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫМ И БОКОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Полученные выше результаты позволяют сделать утверждение, что синтезированные системы управления продольным и боковым движением обеспечивают асимптотически устойчивое поведение БПЛА при движении соответственно в продольной и поперечной плоскостях, а также гарантируют компенсацию влияния внешних неизмеряемых возмущающих воздействий, имеющих кусочно-постоянную форму. Однако в многих работах проводилось исследование при условии, что БПЛА движется исключительно только либо в продольной, либо в поперечной плоскостях. При этом в реальных условиях, в том числе при действии внешних возмущений, это движение может быть совмещено. Поэтому мы проведем исследование поведения БПЛА с синтезированными синергетическими законами управления продольным и боковым движением при их совместном действии.

Структура системы управления пространственным движением БПЛА, состоящей из двух подсистем – подсистемы продольного и подсистемы бокового движения – представлена на рис. 8.

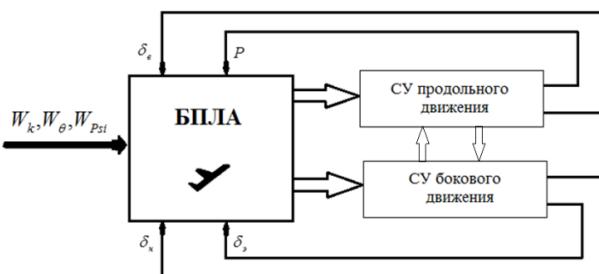


Рис. 8. Структура системы управления пространственным движением БПЛА

При исследовании системы управления пространственным движением БПЛА (рис. 8) предполагаем, что на БПЛА действует ветровое возмущение, проекции которого имеют вид, представленный на рис. 1, 2 и 5.

При моделировании будем использовать математическую модель пространственного движения БПЛА в траекторной системе координат, параметры системы управления продольным и боковым движением. При этом комбинированная система управления учитывает взаимовлияние между подсистемами, то есть при моделировании предполагается, что переменные, значения которых фиксировалось при рассмотрении каждой из подсистем, теперь изменяются в процессе работы всей системы в целом.

Для выполнения процедур моделирования системы управления пространственным движением БПЛА были разработаны схемы в пакете Simulink. Результаты моделирования системы комбинированного управления (с подсистемами продольного и бокового движения) пространственным движением БПЛА в условиях воздействия ветровых возмущений представлены на рис. 9–18.

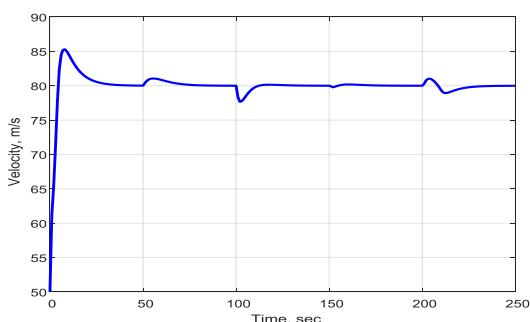


Рис. 9. Переходной процесс относительно линейной скорости V_k

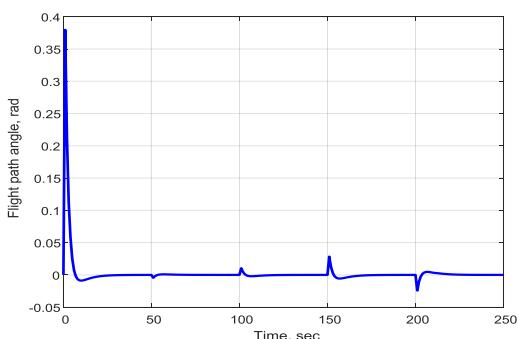


Рис. 10. Переходной процесс относительно угла наклона траектории θ

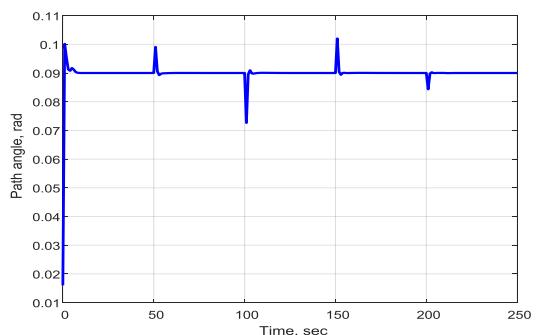


Рис. 11. Переходный процесс относительно угла пути Ψ

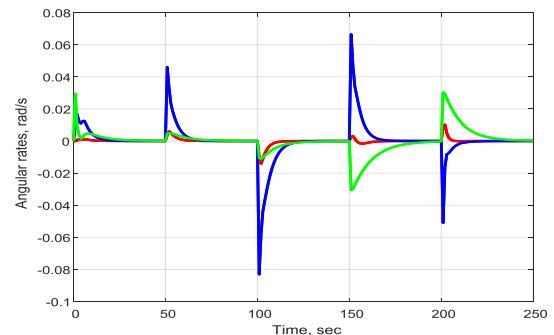


Рис. 12. Переходные процессы относительно проекций угловой скорости

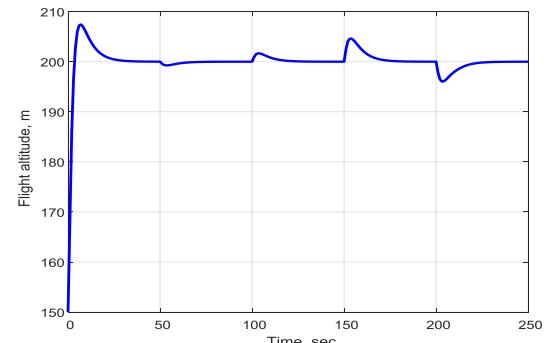


Рис. 13. Переходной процесс относительно высоты полета H

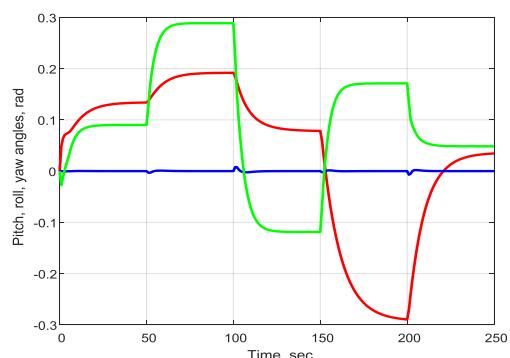


Рис. 14. Переходные процессы относительно углов рысканья, тангажа и крена

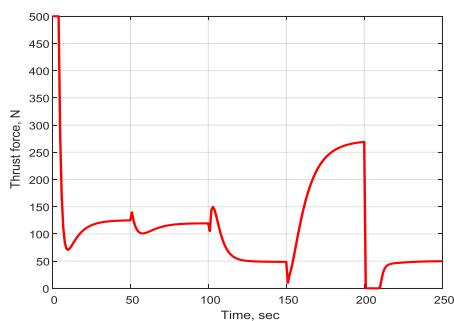


Рис. 15. Изменение силы тяги силовой установки Р

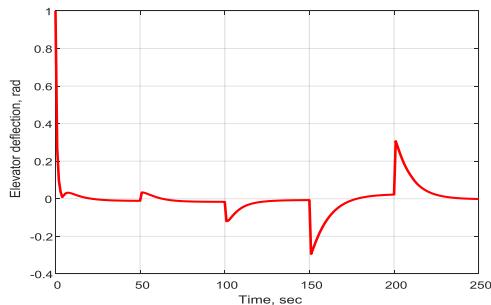


Рис. 16. Изменение угла отклонения руля высоты δ_e

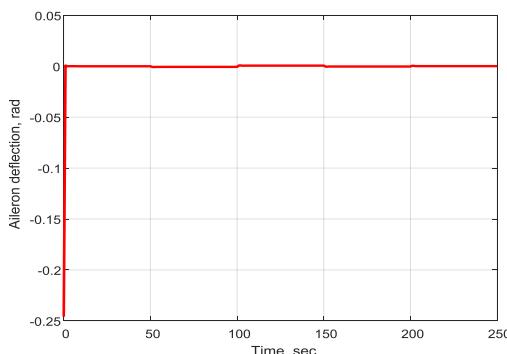


Рис. 17. Изменение угла отклонения элерона δ_a

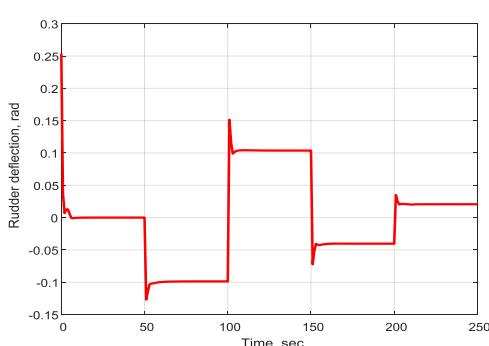


Рис. 18. Изменение угла отклонения руля направления δ_r

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый метод синергетического синтеза законов управления пространственным движением БПЛА с жестким крылом в условиях ветровых возмущений, отличающийся от ранее предложенных [33] использованием раздельных процедур синтеза законов управления продольным и боковым движением БПЛА с жестким крылом.

Из представленных результатов моделирования синтезированной замкнутой системы управления БПЛА при продольном и боковом движении можно сделать выводы, что предложенный метод гарантирует асимптотически устойчивое поведение БПЛА с жестким крылом в окрестности совокупностей целевых инвариантов каждой из подсистем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00645.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yang L., Liu Z., Wang X., Xu Y. An optimized image-based visual servo control for fixed-wing unmanned aerial vehicle target tracking with fixed camera // IEEE Access. – 2019. – 7. – P. 68455-68468.
2. Mathisen S.G., Leira F.S., Helgesen H.H., Gryte K. and Johansen T.A. Autonomous ballistic airdrop of objects from a small fixed-wing unmanned aerial vehicle // Autonomous Robots. – 2020. – 44 (5). – P. 859-875.
3. Kwak J., Park J.H., Sung Y. Emerging ICT UAV applications and services: Design of surveillance UAVs // International Journal of Communication Systems. – 2021. – 34 (2). – P. e4023.
4. Cerro J.D., Cruz Ulloa C., Barrientos A., de León Rivas J. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey // Agronomy. – 2021. – 11 (2). – P. 203.
5. Corcoran E., Winsen M., Sudholz A., Hamilton G. Automated detection of wildlife using drones: Synthesis, opportunities and constraints // Methods in Ecology and Evolution. – 2021. – 12 (6). – P. 1103-1114.
6. Ingabire A. and Sklyarov A.A. Fixed-wing UAVs navigation in the presence of wind: a survey // Engineering journal of Don. – 2019. – Vol. 54, No. 3. – P. 1-10.
7. Wang B.H., Wang D.B., Ali Z.A., Ting Ting B. and 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.
8. Stastny T. and Siegwart R. Nonlinear model predictive guidance for fixed-wing UAVs using identified control augmented dynamics // IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems. – 2018. – P. 432-442.
9. Liu C. and Chen W.H. Disturbance rejection flight control for small fixed-wing unmanned aerial vehicles // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2016. – Vol. 39, No. 12. – P. 2810-2819.
10. Kumar K.S., Arya H. and Joshi A. Longitudinal Control of Agile Fixed-Wing UAV Using Backstepping // IEEE Aerospace Conference. – 2019. – P. 1-11.
11. Kumar K.S., Arya H., Joshi A. Longitudinal Control of Agile Fixed-Wing UAV Using Backstepping // IEEE Aerospace Conference. (Montana, USA). – 2019. – P. 1-11.
12. Safwat E., Weiguo Z., Kasseem M., et al. Robust Nonlinear Flight Controller for Small Unmanned Aircraft Vehicle based on Incremental BackStepping // AIAA Scitech Forum (Orlando, USA). – 2020. – URL: <https://doi.org/10.2514/6.2020-0854>.
13. Stastny T., Siegwart R. Nonlinear model predictive guidance for fixed-wing UAVs using identified control augmented dynamics // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (Dallas, USA). – 2018. – P. 432-442.
14. Mathisen S.H., Fossen T.I., Johansen T.A. Non-linear model predictive control for guidance of a fixed-wing UAV in precision deep stall landing // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (Colorado, USA). – 2015. – P. 356-365.
15. Gunes U., Sel A., Kasnakoglu C., et al. Output feedback sliding mode control of a fixed-wing UAV under rudder loss // AIAA Scitech Forum (San Diego, USA). – 2019. – URL: <https://doi.org/10.2514/6.2019-0911>.
16. Hervas J.R., Kayacan E., Reyhanoglu M., et al. Sliding mode control of fixed-wing UAVs in windy environments // 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (Singapore). – 2014. – P. 986-991.
17. Patrikar J., Makkapati V.R., Pattanaik A., et al. Nested Saturation Based Guidance Law for Unmanned Aerial Vehicles // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2019. – Vol. 141, No. 7. – URL: <https://doi.org/10.1115/1.4043107> (date of the application: 15.01.2020).

18. Beard R.W., Ferrin J., Humpherys J. Fixed wing UAV path following in wind with input constraints // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2014. – Vol. 22, No. 6. – P. 2103-2117.
19. Gomez J.F., Jamshidi M. Fuzzy logic control of a fixed-wing unmanned aerial vehicle // 2010 World Automation Congress (Kobe, Japan). – 2010. – P. 1-8.
20. Apkarian P., Noll D. Nonsmooth H_∞ synthesis // IEEE Transactions on Automatic Control. – Vol. 51 (1). – P. 71-86.
21. Uyulan C., Yavuz M.T. Robust H-infinity control applied on a fixed wing unmanned aerial vehicle // Advances in aircraft and spacecraft science. – 2019. – Vol. 5, No. 6. – P. 371-389.
22. Cao S., Shen L., Zhang R., et al. Adaptive Incremental Nonlinear Dynamic Inversion Control Based on Neural Network for UAV Maneuver // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Hong Kong, China). – 2019. – P. 642-647.
23. Lungu, M. Backstepping and dynamic inversion combined controller for auto-landing of fixed wing UAVs/ M. Lungu // Aerospace Science and Technology. – 2020. – Vol. 96. – P. 105526.
24. Xi A., Zhao Y. L1 adaptive control of the flying wing UAV with unknown time-varying disturbances // 11th Asian Control Conference (Australia). – 2017. – P. 543-648.
25. Колесников, А.А. Новые нелинейные методы управления полетом. – М.: Физматлит, 2013. – 196 с.
26. Колесников А.А., Кобзев В.А., Нуцен Ф. Синергетический синтез систем управления движением самолетов-амфибий, функционирующих в экстремальных условиях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 5. – С. 150-155.
27. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
28. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРГУ. – 2006. – Т. 61, № 6. – С. 10-38.
29. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолета. Динамика продольного и бокового движения. – М.: Машиностроение, 1979. – 352 с.
30. Колесников А.А., Колесников Ал.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.
31. Колесников А.А. Метод интегральной адаптации нелинейных систем на инвариантных многообразиях: наихудшие возмущения // Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010). – СПб.: Изд-во «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 22-28.
32. Veselov G.E., Ingabire A. Synergetic Synthesis of Control of Longitudinal Flight Dynamics of UAV in the Presence of Wind Disturbances with Input Constraints // 2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis, ICCAD 2020 – Proceedings. DOI:10.1109/ICCAD49821.2020.9260535.
33. 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.

Анализ хаотического сигнала в канале связи с введением полезной информацией методом параметрической модуляции

Мушенко Алексей Сергеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
asmushenko@sfedu.ru

Золкин Александр Дмитриевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
a.d.zolkin@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача оценки практической эффективности скрытой передачи сигналов, реализуемой с помощью генератора хаотических колебаний Шимизу-Мориока путем модуляции его параметров. Приведен пример программной реализации передачи числового кода по хаотической несущей с его последующим восстановлением на стороне приемника. Выполнен анализ псевдослучайного сигнала в канале связи на предмет нахождения в нем подмешанного полезного сигнала путем разложения в ряд Фурье и исследования с помощью автокорреляции. Приводится вывод о стеганографичности рассматриваемого метода скрытой передачи информации.

Annotation. We explore the problem of practical application efficiency of hidden signal transmission by using of Shimizu-Morioka chaotic generator oscillations as a signal carrier. We present a software implementation of transmitting a numeric code via chaotic carrier with its subsequent reconstruction on the receiver side. We analyzed a pseudo-random signal in the communication channel by using methods of Fourier transform and autocorrelation. The analysis goal is to determine the steganographic resistance of signals transmitted with explored method via communication channel with a chaotic carrier

Ключевые слова: нелинейные системы, передача информации, динамический хаос, стеганография, синергетика.

Keywords: nonlinear systems, data transfer, dynamic chaos, steganography, synergistics.

I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки новых и перспективных методов защищенной и (или) скрытой передачи информации, основанных на нетрадиционных методах кодирования.

Общей целью рассматриваемых в работе исследований является развитие подхода, основанного на передаче полезных сигналов с использованием генераторов хаотических колебаний в качестве генераторов несущего сигнала. Это позволяющее осуществить защиту информационного сигнала путем маскирования хаотическими колебаниями. Наиболее выигрышным в плане обеспечения скрытности передачи информации является подход с нелинейным внедрением полезного сигнала непосредственно в саму структуру генератора хаотических колеба-

ний. Однако при такой постановке задачи возникает проблема реконструкции или «выделения» полезного сигнала из маскирующих его хаотических составляющих на стороне приемника. Для решения этой проблемы предлагается использовать подход, позволяющий считать подмешанный полезный сигнал ненаблюдаемой переменной в модели хаотического генератора и построить так называемый наблюдатель состояния на стороне приемника для восстановления значения этого параметра. Основной задачей в этом случае становится математический синтез наблюдателя с учетом нелинейной модели хаотического генератора. Дело в том, что несмотря на строгость существующей общей процедуры синтеза синергетического наблюдателя, ее практическое применение к конкретной нелинейной математической модели всегда носит характер научного исследования, направленного на решение задачи аналитического конструирования структуры конкретной системы.

В рамках применения изложенного общего подхода и методов можно создавать одно- и двухканальные системы передачи информации. Большой интерес вызывают исследования возможности программной (практической) реализации подобных систем путем демонстрации передачи тестовых сообщений, а также исследование степени скрытости самого факта передачи сигнала, маскированного хаотическими колебаниями – так называемой стеганографичности сигнала. Стеганографичность сигнала может быть исследована вне зависимости от типа и числа каналов синергетического наблюдателя на стороне приемника, т.к. в этом случае нас интересует скрытость и сложность раскрытия информации после ее нелинейного подмешивания в модель хаотического генератора.

В процессе выполнения представленных в статье исследований были предварительно решены следующие задачи:

– разработана процедура синтеза одноканального синергетического наблюдателя для двухканальной системы передачи информации на основе хаотического генератора Шимизу-Мориока, построена имитационная модель системы в пакете MATLAB/Simulink, получены результаты компьютерного моделирования;

— выполнена практическая (программная) реализация одноканальной системы защищенной передачи данных на основе хаотического генератора Шимизу–Мориока и одноканального синергетического наблюдателя, построенных для модели этого генератора ранее, в предыдущем исследовании.

Для решения поставленных в статье задач выполнен анализ хаотического сигнала с позиции криптографической и стеганографической стойкости на примере полученной одноканальной системы передачи информации на основе хаотического генератора Шимизу–Мориока с использованием методов автокорреляции и преобразования Фурье.

II. СТЕГАНОГРАФИЯ И СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Слово «стеганография» образовано от двух греческих слов: «stegano» (тайно) и «graphy» (пишу). То есть означает «тайнопись». Этот способ передачи информации использовался тысячелетиями. Еще в 5 веке Гистией татуировал сообщения на голове лысого раба, ждал пока волосы отрастут а затем отправлял его доставить сообщение. Дематат же, использовал для этой цели деревянные таблички, покрытые воском, что использовались в то время для письма. Он снимал воск, выщарапывал сообщение на самом дереве, а затем вновь заливал табличку воском. Таблички со скрытым сообщением и без выглядели совершенно одинаково [1].

Одним из самых известных методов стеганографии является использование симпатических (невидимых) чернил, что проявляются при определенных обстоятельствах (освещение, нагрев, воздействие определенного химического вещества). Типичным примером стеганографии так же является запись на боковой стороне колоды карт, расположенных в определенном порядке или трафареты, оставляющие видимыми только значащие буквы на определенной странице [2]. В настоящее время применяются более быстрые и практические решения. Современные методы стеганографии позволяют прятать сообщения в файлах и изображениях [3].

Большинство методов анализа эффективности стеганографической передачи требуют особого анализа, выполняемого с целью определения наличия в передаваемом сообщении так называемого «второго дна». Например для метода наименее значимого бита (LSB, least significant bit) [4] существует контр метод для определения изображений с зашифрованным сообщением при помощи LSB [5]. Ниже приведем краткий обзор методов стеганографического кодирования информации и ее детектирования.

В [6–8] для создания устойчивых для сжатия и изменения, но невидимых без сравнения с оригинальным изображением водяных знаков, используется преобразование Фурье. Дискретное преобразование Фурье (DFT, discrete Fourier transform) сравнивается с другими стеганографическими методами, такими как дискретное вейвлет-преобразование (DWT, discrete wavelet transform) и дискретное косинусное преобразование (DCT, discrete cosine transform). В [9] для тех же целей вместе с DFT используют полярное картографирование (LPM, log-polar mapping).

В [10] на основе квантового преобразования Фурье (QFT, quantum Fourier transform) и модификации LSB для изображений, передаваемых не при помощи обычных бит, а кубит (qbit), именуемым наименее значимый кубит (LSQb, least significant qubit) стеганографизируют квантовые (использующие кубиты) изображения. В [11] предлагается использовать изображения для авторизации/передачи сообщений при помощи DFT и MD5. В [12] проводится анализ различных методов стеганографии, в числе которых дискретное косинусное преобразование и дискретное преобразование Фурье. Как способ анализа результатов стеганографических преобразований может использоваться автокорреляция [13–16].

III. ОПИСАНИЕ РАССМАТРИВАЕМОГО ПОДХОДА

Здесь и далее под полезным сигналом будет иметься сигнал в виде синусоиды с учащающимся периодом колебаний, изображенном на рис. 1. Хаотические системы – апериодические системы с крайней чувствительностью к начальным условиям [17]. На основе развитой в научной школе кафедры синергетики и процессов управления Южного федерального университета метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) и положений синергетической теории управления [18] можно синтезировать так называемый нелинейный синергетический наблюдатель, что позволяет по генерируемому нелинейной и даже хаотической системой сигналу определять её параметры. Используя нелинейное подмешивание (при котором полезный сигнал внедряется напрямую в структуру генератора колебаний [19] и синергетический наблюдатель в качестве инструмента адаптивного метода приема можно построить систему кодирования и реконструкции сигнала с хаотической несущей, пример которого приведен на рис. 2 [20].

В работе [20] для синтеза наблюдателя была использована система Шимизу–Мориока [21], описываемая следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -ax + by - yz; \\ \dot{y} &= x; \\ \dot{z} &= y^2 - z. \end{aligned} \quad (1)$$

Полезный сигнал $\mu(t)$ подмешивается к коэффициенту b следующим образом:

$$b^*(t) = b + \mu(t),$$

здесь $b^*(t)$ – новый вид коэффициента b , модулированный полезным сигналом.

Полная процедура синтеза одноканальной системы передачи информации с хаотической несущей, восстанавливающей полезный сигнал с помощью синергетического наблюдателя, приведена в работе [20]. Здесь же мы будем анализировать работу этой системы, проводя ее численное моделирование на имитационной модели с подмешиванием полезного сигнала и без подмешивания, чтобы определить стеганографичность сигнала, поступающего в канал связи перед его восстановлением на стороне получателя с помощью рассмотренного в [20] метода скрытой передачи информации.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ХАОСОДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Описанный в предыдущем разделе подход к защищенной передаче информации в данный момент еще не получил практического внедрения, ранее не проводились специальные исследования по детектированию наличия скрытых сообщений в передаваемых хаотических сигналах при нелинейном подмешивании в генератор хаотических колебаний. Поэтому для определения степени стеганографичности предлагаемой в [20] системы было решено использовать общие методы исследования такого рода систем: методы автокорреляции и разложения в ряд Фурье.

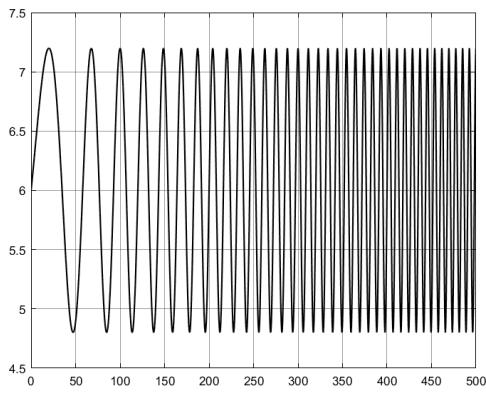


Рис. 1. Полезный сигнал

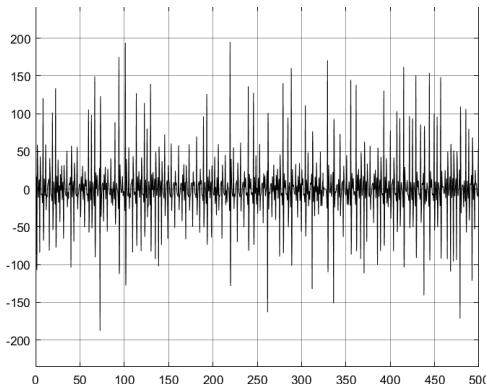


Рис. 2. Пропущенный через хаотический генератор сигнал с полезной нагрузкой

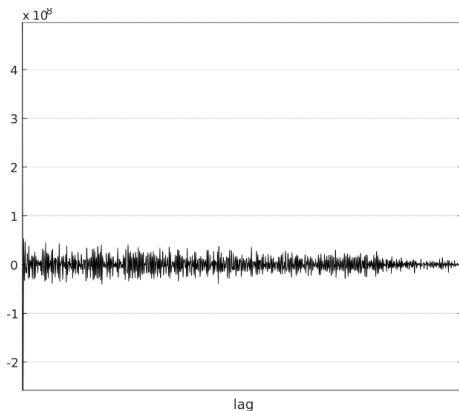


Рис. 3. Коррелограмма сигнала, несущего полезную информацию

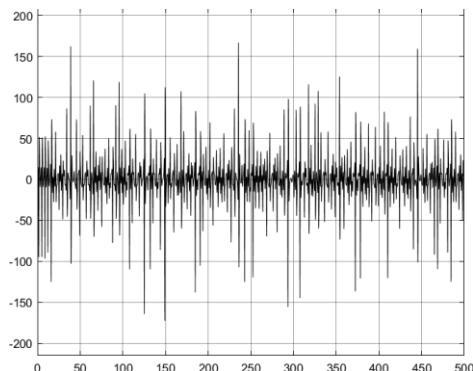


Рис. 4. Пропущенный через хаотический генератор анализируемый сигнал без полезной нагрузки

A. Исследование автокорреляцией

Автокорреляция или серийная корреляция [22] – корреляция сигнала с самим собой с определённой задержкой во времени. Можно сказать это похожесть сигнала на свою же копию, «сдвинутую» во времени.

Для получения коррелограммы (графика автокорреляции) была использована MATLAB функция *xcorr* [23].

Формула для вычисления автокорреляции имеет следующий вид:

$$r_{xy}[l] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m] \cdot x[m + l],$$

где l – шаг смешения (lag), $x[m]$ – анализируемый сигнал.

Вид сигнала с полезной нагрузкой (ведется модуляция параметра b системы (1)) и соответствующая ему коррелограмма представлена на рис. 2 и 3. Далее был взят сигнал без полезной нагрузки (модуляция параметра b системы (1) не применяется), изображенный на рис. 4.

С целью оценки и сравнения вида коррелограмм, изображенных на рис. 3, 5 и 7, дополнительно в качестве эталонного анализируемого сигнала был взят случайный сигнал, сгенерированный при помощи MATLAB функции *randn* [24], вид эталонного анализируемого сигнала и его коррелограмма показаны на рис. 6 и 7.

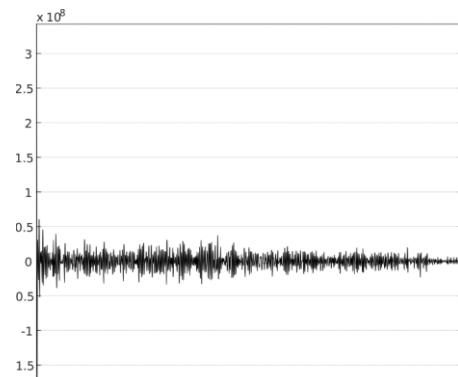


Рис. 5. Коррелограмма сигнала, не несущего полезной информации

На основе анализа полученных коррелограмм видно, что их отличие друг от друга несущественно. Поэтому можно сделать вывод, что при анализе сигнала с хаотической несущей с помощью автокорреляции подтверждается стегографичность рассматриваемого метода

кодирования. Тем не менее, для исследования свойства стенографичности полезно рассмотреть и другие методы анализа кодированного сигнала в канале связи.

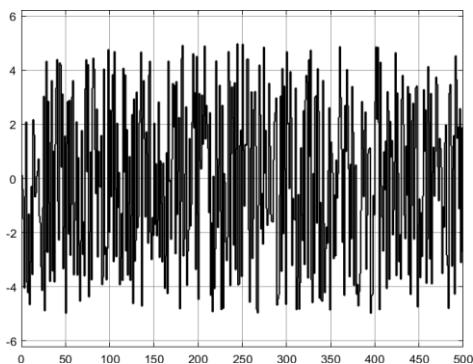


Рис. 6. Случайный эталонный сигнал

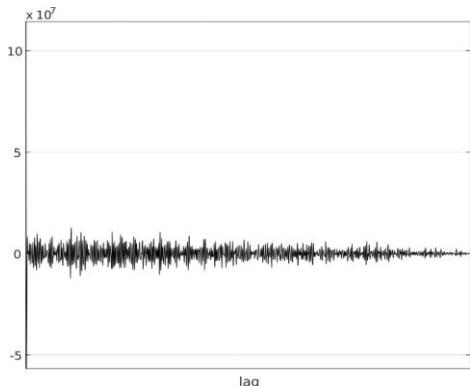


Рис. 7. Коррелограмма случайного сигнала

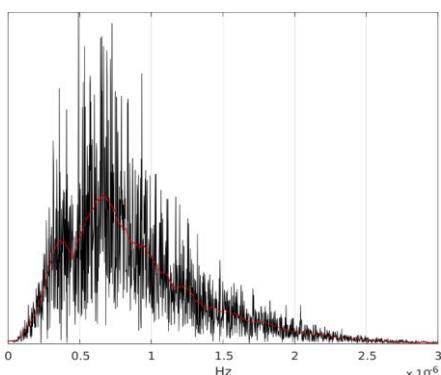


Рис. 8. График разложения в ряд Фурье сигнала с полезной нагрузкой

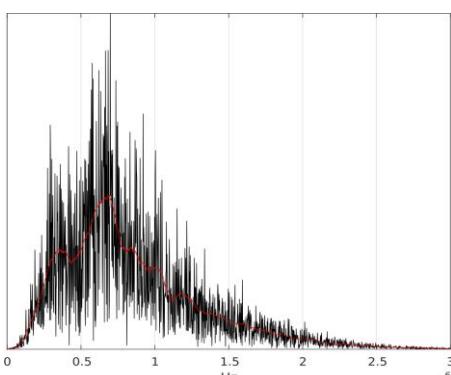


Рис. 9. График разложения в ряд Фурье сигнала без полезной нагрузки

B. Анализ разложением в ряд Фурье

Разложение в ряд Фурье [25] позволяет увидеть неочевидную периодичность сигнала, потому как результат преобразования Фурье – частотный спектр сигнала.

Для более точного анализа графиков были применены фильтр Савитского-Голая. Кривая отфильтрованного сигнала будет изображена на графиках красным.

Анализируемый сигнал с нагрузкой и его разложение в ряд Фурье представлены на рис. 2 и 8 соответственно. Ведущая частота в данном примере: 6,56E-07 Гц.

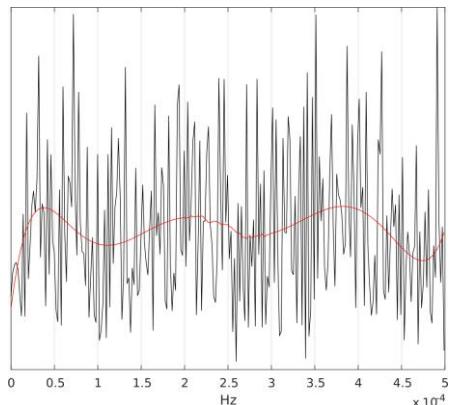


Рис. 10. Случайный сигнал и его спектrogramма

Далее для сравнения был взят сигнал без полезной нагрузки, изображенный на рис. 4. Результат разложения в ряд Фурье представлен на рис. 9. Ведущая частота в данном примере: 6,94E-07 Гц.

При анализе нами было учтено изменение значения ведущей частоты, но изменение ведущей частоты, а также общий внешний вид спектрограммы не позволяют сделать вывод о существенном различии сигналов с нагрузкой и без.

Далее, для сравнения со детерминированным хаотическим сигналом, был взят эталонный случайный сигнал и проанализирован подобным образом. Графики случайного сигнала и его спектрограммы изображены на рис. 10.

Как видно из рис. 8–10, спектрограмма случайного сигнала сплошная, чем кардинально отличается от спектрограмм изучаемой системы.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ коррелограмм показал, что автокорреляционный метод анализа сигнала в случае с сигналом с хаотической несущей не позволяет детектировать факт передачи полезного сигнала и тем самым подтверждает стеганографичность данной системы.

Анализ спектрограмм показал, что система с нагрузкой и без выдаёт практически идентичный по характеристикам сигнал, различия вписываются в статистическую погрешность. Уровень ведущей частоты спектрограммы отличается на 0,002 Гц. Что, конечно, является положительным моментом в плане подтверждения стеганографичности нашей системы (нельзя определить факт ведения передачи или факта работы вхолостую).

Но в то же время спектограммы для детерминированного хаотического сигнала существенного отличаются от спектограмм случайного сигнала. Это свидетельствует о потенциальной возможности детектирования наличия детерминированного хаотического сигнала в канале связи. Однако фактически сигналы в канале связи не являются столь же случайными, как показанный здесь эталонный сигнал, поэтому возможны дополнительные исследования в реальных физических системах на предмет возможности к стеганографической передачи.

Данное исследование является одним из первых шагов в изучении физической реализуемости, криптостойкости и возможности к стеганографической передачи информации, показанного в [20] метода передачи информации. Кроме того, результаты данного исследования могут быть использованы при дополнительном анализе относительной стеганографичности хаосодинамических систем передачи данных на основе различных моделей хаотических генераторов, т.е. позволят выработать качественные и количественные критерии для подбора хаотического генератора при разработке такого ряда систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kadhim I.J., Premaratne P., Vial P.J., Halloran B. Comprehensive survey of image steganography: techniques, evaluations, and trends in future research// Neurocomputing. – Wollongong, 2018.
2. Громов В.И., Васильев Г.А. Энциклопедия безопасности – 2009.
3. Sahar E.I., Rahman A.A comparative analysis of image steganography based on DCT algorithm and steganography tool to hide nuclear reactors confidential information // Computers and Electrical Engineering. – Cairo. 2018. – P. 380-399.
4. Hussain M., Wahab A.W.A., Idris Y.I.B., Ho Ki-Hyun Jung A.T.S. Image steganography in spatial domain: a survey // Signal Processing: Image Communication. – 2018. – P. 46-66.
5. Fridrich J., Goljan M., Du R. Reliable detection of LSB steganography in color and grayscale images // MM&Sec '01 Proceedings of the 2001 workshop on Multimedia and security: new challenges. – New York. 2001. – P. 27=30.
6. O Ruanaidh J.J.K. Dowling W.J. Boland F.M. Phase watermarking of digital Images. – 1996. – Vol. 3. – P. 239–242.
7. Raja, K.B., Chowdary, C.R., Venugopal, K.R., Patnaik, L.M. A secure image steganography using LSB, DCT and compression techniques on raw images. – 2005. – No. 1619431.– P. 171-176.
8. Potdar V.M., Song H., Elizabeth C. A survey of digital image watermarking techniques. – 2005. – Vol. 2005. – P. 709-716.
9. Kang X., Huang J., Zeng W. Efficient general printscanning resilient data hiding based on uniform log-polar mapping // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2010. – Vol. 5, No. 5378607. – P. 1-12.
10. Wang S., Sang J., Song X., Niu X. Least significant qubit (LSQb) information hiding algorithm for quantum image // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – 2015. – Vol. 73. – P. 352-359.
11. Ghoshal N., Mandal J.K. A novel technique for image authentication in frequency domain using discrete Fourier transformation technique. – 2008. – Vol. 21. – P. 24-32.
12. Cheddad A., Condell J., Curran K., Mc Kevitt P. Digital image steganography: survey and analysis of current methods // Signal Processing. – 2010. – Vol. 90. – P. 727-752.
13. Mart'inez-Gonz'alez R.F., D'iaz-M'endez J.A., Palacios-Luengas L., L'opez-Hern'andez J., Vazquez-Medina R. A steganographic method using Bernoulli's chaotic maps // Computers and Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 54. – P. 435-449.
14. Li M., Kulhandjian M., Pados D.A., Batalama S.N., Medley M.J., Matyas J.D. On the extraction of spread-spectrum hidden data in digital media. – 2012. – No. 6364055. – P. 1031-1035.
15. Manglem Singh K., Chanu Y.J., Tuithung T. Steganalysis of steganography based on noncausal linear predictor // International Journal of Computers, Communications and Control. – 2014. – P. 623-632.
16. Alattar A.M., Meyer J. Watermark re-synchronization using log-polar mapping of image autocorrelation. – 2003. – Vol. 2. – P. 928–931.
17. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // Journal of the atmospheric sciences. – 1963. – Vol. 20. – P. 130–141.
18. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
19. Andrievsky B.R. and Fradkov A.L. Adaptive-based Methods for Information Transmission by Means of Chaotic Signal Source Modulation // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72, No. 9. – P. 1967-1980.
20. Колесников А.А., Мушенко А.С., Дзюба Ю.Н., Золкин А.Д. Синергетический наблюдатель переменных состояния в задачах реконструкции систем с хаотической динамикой // Труды Всероссийской научной конференции по проблемам управления в технических системах. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2017. – С. 58-61.
21. Shil'nikov A.L. On bifurcations of the Lorenz attractor in the Shimizu-Morioka model // Physica D. – 1993.
22. Flajolet P., Sedgewick R. Analytic combinatorics. – Cambridge University Press, 2009. – P. 826. – ISBN: 9780521898065. – URL: <http://algo.inria.fr/flajolet/Publications/book.pdf> (online; accessed: 2018-12-26).
23. MathWorks The. Autocorrelation. – URL: mathworks.com/help/signal/ref/xcorr.html (online; accessed: 2018-04-05).
24. MathWorks The. randn. – URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/randn.html> (online; accessed: 2018-05-18).
25. Рудин V. Основы математического анализа – М.: Мир, 1976. – 321 с.

Синтез нелинейной системы управления активной подвеской автомобиля с компромиссным учетом кинематических ограничений

Синицын Александр Сергеевич

Акционерное общество
«Научно-конструкторское бюро
вычислительных систем»

Таганрог, Россия
axeom18@gmail.com

Аннотация. Основной целью данной работы является разработка нелинейного закона управления активной подвеской автомобиля с учетом кинематических ограничений. Нелинейная динамическая модель включает следующие переменные состояния подвески: перемещение подпрессоренной и неподпрессоренной масс, скорость и ускорение, угловое положение угловую скорость и ускорение подпрессоренной массы. Основной целью управления является повышение комфорта. В качестве модели дорожного покрытия используется белый шум с ограниченной полосой. Результаты моделирования показывают, что комфорт движения может быть существенно улучшен за счет использования синергетического регулятора, учитывающего кинематические ограничения.

Аннотация. The main purpose of this paper is to design a nonlinear control law for a hydraulic car active suspension system with taken into account kinematic constrains. Nonlinear dynamic model describe next main suspension parameters: sprung and unsprung mass displacement, velocity and acceleration, sprung mass angular position, velocity and acceleration. Improve of ride comfort is chosen as main resulting characteristic of investigated control law. White noise with limited bandwidth selected as a road distribution model. Simulation results show that the ride comfort can be improving by using synergistic regulator which take in account kinematic constraints.

Ключевые слова: синергетика, полная модель подвески автомобиля, гидравлическая подвеска, кинематические ограничения

Keywords: synergistic, full vehicle model, hydraulic suspension, kinematic constrains.

I. ВВЕДЕНИЕ

Комфорт при движении автомобиля в значительной мере определяется параметрами подвески. Традиционно системы автомобильной подвески делят на три группы: пассивные, полуактивные и активные. Пассивные системы получили наиболее широкое распространение за счет дешевизны, простоты и надежности, однако характеристики пассивной подвески закладываются на этапе проектирования и оптимизируются на некоторый «средний» случай. Таким образом система пассивной подвески эффективна лишь в узкой области частот и амплитуд возмущающего воздействия.

Для расширения области эффективного функционирования используют элементы с переменным коэффициентом демпфирования [1, 2]. Подвеска с элементами подобного типа называется полуактивной. Полуактивные системы подвески с электрореологическими и магнитореологическими демпферами находятся под пристальным вниманием исследователей [3, 4]. В работах [5, 6] исследуется полуактивная система подвески, в которой коэффициент демпфирования изменяется путем непрерывного изменения поперечного сечения управляемого электромагнитного клапана.

Активная система подвески отличается от полуактивной тем что сила, необходимая для поддержания кузова в заданном положении, формируется управляемым элементом подвески. В качестве такого элемента может выступать гидроцилиндр, пневмоцилиндр или электропривод. Системы с подобными элементами также называют полностью несущими.

Использование активных элементов подвески позволяет обеспечить большую область эффективного функционирования (по сравнению с пассивными или полуактивными системами). В силу своей эффективности, активная система подвески привлекала внимание многих исследователей из академической и инженерной среды. За последние десятилетия появилось множество работ посвященных изучению активных и полуактивных систем подвески. В работе [7] Ахмадиан и Паре исследуют характеристики трех различных схем управления для одной опоры активной подвески. Идеи обнаружения и диагностики неисправностей, с использованием модели активной подвески, исследованы Фишером, Борнером, Шмиттом и Изерманом [8]. Глубокий обзор проблемы оптимального управления активной подвеской сделан Хроватом [1]. Для решения задачи управления системой активной подвески используются методы теории нечеткого управления [9, 10] и H_∞ теории [11]. Также для управления активной подвеской предлагаются регуляторы с переменной структурой [12, 13]. В данной работе теория синергетического управления используется для создания закона управления активной подвеской, рас-

ширяющегося обладает эффективного функционирования системы за счет компромиссной схемы учета кинематических ограничений.

II. МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Нелинейная модель автомобильной подвески, используемая в данной работе обладает 7 степенями свободы: два угловых перемещения (крен, тангаж) и одно линейное перемещение подпрессоренной массы (кузова) и четыре линейных перемещения неподпрессоренных масс (колес). Схема используемой модели представлена на рис. 1.

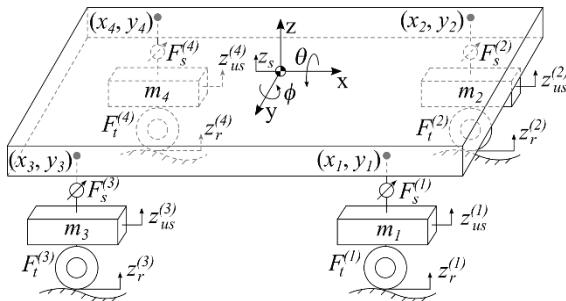


Рис. 1. Модель автомобильной подвески

На рис. 1 обозначениям соответствует: M , I_x и I_y подпрессоренная масса и моменты инерции по продольной и поперечным осям соответственно; $z_{us}^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3, 4$) – перемещение неподпрессоренных масс; m_i – неподпрессоренные массы; $F_s^{(i)}$ – силы, производимые опорами подвески; $F_t^{(i)}$ – силы, производимые шинами; z_s , ϕ и θ – вертикальное перемещение, крен и тангаж кузова соответственно; (x_i, y_i) – точки крепления опор подвески к кузову.

Динамика системы описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M\ddot{z}_s = u_z + gM; \\ I_x\ddot{\theta} = u_\theta \cos\theta; \\ I_y\ddot{\phi} = u_\phi \cos\phi; \\ m_i z_{us}^{(i)} = F_t^{(i)} - F_s^{(i)} + gm_i, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$u_z = \sum_{i=1}^4 F_s^{(i)}; \quad u_\theta = \sum_{i=1}^4 y_i F_s^{(i)}; \quad u_\phi = \sum_{i=1}^4 x_i F_s^{(i)}; \quad (2)$$

g – ускорение свободного падения.

Кинематическая схема одной опоры активной подвески с пневмогидравлическим исполнительным механизмом (ИМ) представлена на рис. 2, где F_c – сила, производимая гидравлическим цилиндром; l_1 , l_2 , l_3 – геометрические параметры подвески. Силы F_s , производимые идеальным ИМ определяются выражением (для упрощения записи индекс i опущен):

$$F_s = \frac{F_c(l_3^2 + l_1^2 - l_2^2)}{2l_1l_3}. \quad (3)$$

Длина цилиндра l_3 вычисляется исходя из геометрии подвески и относительного перемещения подвески

$$\Delta z = z - z_{us}, \quad (4)$$

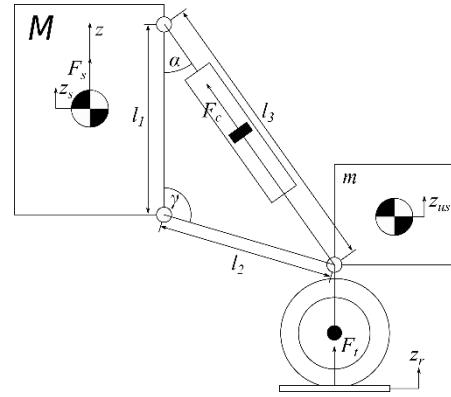


Рис. 2. Кинематическая схема

$$l_3 = \sqrt{\frac{l_2^2 + l_1^2 + 2l_1\Delta z}{\sqrt{1+(\Delta z)^2}}}, \quad (5)$$

где координата по оси z точки крепления подвески определена как

$$z = z_s + x \sin \phi + y \sin \theta, \quad (6)$$

В работе [12] сила, производимая гидроцилиндром, определяется дифференциальным уравнением:

$$F_c = p_c A_c - \eta \dot{s}_c, \quad (7)$$

где p_c – давление в гидроцилиндре; A_c – площадь поршня; η – кинематическая вязкость гидравлической жидкости; s_c – перемещение поршня, связанное с перемещением элементов подвески выражением:

$$s_c = l_3 - \sqrt{l_2^2 + l_1^2}. \quad (8)$$

Изменение давления в гидроцилиндре описывается нелинейным дифференциальным уравнением [13]:

$$\dot{p}_c = \beta \frac{\dot{s}_c A_c + q_a + u}{V_0 + A_c s_c}, \quad (9)$$

где β – модуль упругости; V_0 – минимальный объем жидкости в полости цилиндра; u – управляющий поток жидкости; q_a – поток жидкости через малое отверстие, связывающее гидроцилиндр и пневматический аккумулятор:

$$q_a = cA \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{\Delta p}{4(\Delta p^2 + p_{cr}^2)}}, \quad (10)$$

где c – коэффициент сопротивления потоку; A – площадь отверстия; ρ – плотность гидравлической жидкости; p_{cr} – минимальное давление турбулентного потока; $\Delta p = p_a - p_c$ – перепад давления; p_a – давление в гидроаккумуляторе [13]:

$$\dot{p}_a = -k q_a p_{pr} V_T^k \left(\left(\frac{p_{pr} V_T^k}{p_a} \right)^{1/k} \right)^{-k-1}, \quad (11)$$

где k – показатель адиабаты; p_{pr} – начальный заряд аккумулятора; V_T – объем аккумулятора. Принимая допущение, что шина деформируется только в одном направлении, можно определить силу реакции как:

$$F_t = LWp_t + b\Delta r, \quad (12)$$

где W – ширина шины; b – коэффициент демпфирования; L – длина пятна контакта шины с дорожным покрытием; $\Delta r = z_r - z_{us}$. Длина пятна контакта в соответствии с рис. 3 вычисляется по формуле:

$$L = 2\sqrt{2r_n \Delta r - \Delta r^2}, \quad (13)$$

где r_n – номинальный радиус шины. Предполагая, что деформация шины является адиабатическим процессом можно определить, что давление вшине изменяется в соответствии с уравнением

$$p_t = \frac{V_n p_n}{V_n - \Delta V}, \quad (14)$$

где p_n – давление в ненагруженнойшине;

$$\Delta V = W \left(r_n^2 \cos^{-1} \left(\frac{r_n - \Delta r}{r_n} \right) - \frac{L(r_n - \Delta r)}{2} \right). \quad (15)$$

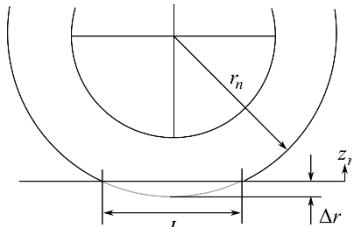


Рис. 3. Схема деформации шины

III. СИНТЕЗ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для создания системы управления столь сложной и нелинейной системой целесообразно воспользоваться методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [16]. Для применения указанного метода необходимо определить набор целей управления, а сама процедура синтеза сводится к поиску законов управления, приводящий систему в окрестность многообразия, на котором выполняются заданные цели управления.

На первом этапе синтеза определим подмножество целей управления нижнего (исполнительского) уровня [17, 18]. Исполнительный уровень представляет собой четыре гидроцилиндра, основная задача которых производить заданное усилие:

$$F_s = F_r, \quad (16)$$

где F_r – заданное (требуемое) усилие. Наряду с целями управления необходимо учитывать конструктивные ограничения, в данном случае таким ограничением является ход поршня гидроцилиндра:

$$|s_c| \leq s_c^{max}. \quad (17)$$

Определим функцию, отражающую отклонение системы от целей управления нижнего уровня иерархической системы управления

$$\xi^{(i)} = F_s^{(i)} - F_r^{(i)}. \quad (18)$$

и функцию переменных состояния:

$$n^{(i)} = s_c^{(i)}. \quad (19)$$

Затем составим макропеременную с использованием уравнений (18), (19), которые описывают целевое многообразие для исполнительского уровня:

$$\psi_L^{(i)} = \xi^{(i)} + a \tan \left(\frac{\pi n^{(i)}}{2s_c^{max}} \right), \quad (20)$$

где a – положительная константа, определяющая степень компромисса между выполнением основной технологической задачей и соблюдением кинематических ограничений.

В действительности, если выразить из (20) функцию $n^{(i)}$ получим:

$$n^{(i)} = -\tan^{-1} \left(\frac{\psi_L^{(i)} - \xi^{(i)}}{a} \right) \frac{2s_c^{max}}{\pi}. \quad (21)$$

Из (21) следует, что на многообразии (20) всюду выполняется условие (18), даже в процессе движения к $\psi_L^{(i)} = 0$, что гарантирует функционирование системы в рамках кинематических ограничений. Сохранение ограничений в системе достигается за счет отклонения от основной цели $\xi^{(i)} = 0$, однако путем выбора коэффициента

$$a = \frac{\epsilon}{\tan \frac{\beta \pi}{2}}. \quad (22)$$

можно обеспечить выполнение условия $|\xi^{(i)}| \leq \epsilon$, на многообразии $\psi_L^{(i)} = 0$ при условии, что $|n^{(i)}| \leq \beta s_c^{max}$, $0 < \beta < 1$, $\epsilon > 0$.

В соответствии с методом АКАР решение $\psi_L^{(i)} = 0$ должно удовлетворять функциональному уравнению:

$$T_L^{(i)} \dot{\psi}_L^{(i)} + \psi_L^{(i)} = 0, \quad (23)$$

где $T_L^{(i)}$ – положительные константы, определяющие скорость сближения системы с многообразием $\psi_L^{(i)} = 0$.

Искомый закон управления $u^{(i)}$ является решением (23) с использованием динамических уравнений системы.

Для синтеза системы управления верхнего уровня необходимо учесть остаточную динамику исполнительного уровня, для этого необходимо из уравнения $\psi_L^{(i)} = 0$, с учетом (20), (18) выразить силу, развивающую опорой

$$F_s^{(i)} = F_r^{(i)} - a \tan \left(\frac{\pi n^{(i)}}{2s_c^{max}} \right), \quad (24)$$

Полагая, что a мало по сравнению с $F_r^{(i)}$ и поршень гидроцилиндра далек от упоров выражение (24) можно упростить

$$F_s^{(i)} = F_r^{(i)}. \quad (25)$$

Следующим шагом является синтез законов управления верхнего уровня абстракции. Основная технологическая задача подвески любого типа – изолировать кузов автомобиля от ударов и вибраций, вызванных неровностями дорожного покрытия. Технологическая задача активной подвески шире: удерживать положение и ориентацию кузова автомобиля в заданном положении:

$$z_s = z_r; \phi = \phi_r; \theta = \theta_r. \quad (26)$$

где z_r – заданное положение кузова; ϕ_r , θ_r – заданные углы ориентации кузова.

Совокупность макропараметров, отражающих технологическую задачу, имеет вид:

$$\begin{aligned}\psi_z &= z_s - z_r; \\ \psi_\phi &= \phi - \phi_r; \\ \psi_\theta &= \theta - \theta_r.\end{aligned}\quad (27)$$

Согласно методу АКАР макропараметр должна удовлетворять решению $[\psi_z, \psi_\phi, \psi_\theta] = 0$ системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \ddot{\psi}_z + \lambda_1 \dot{\psi}_z + \lambda_2 \psi_z = 0 \\ \ddot{\psi}_\phi + \lambda_3 \dot{\psi}_\phi + \lambda_4 \psi_\phi = 0, \\ \ddot{\psi}_\theta + \lambda_5 \dot{\psi}_\theta + \lambda_6 \psi_\theta = 0 \end{cases} \quad (28)$$

где λ_i ($i = 1 \dots 6$) – константы, обеспечивающие устойчивость системы (28). Совместным решением системы (28) и (27) с учетом (1) относительно управляющих воздействий является:

$$\begin{aligned}u_z &= M(\lambda_2(z_r - z_s) - \lambda_1 \dot{z}_s - g); \\ u_\phi &= I_y(\lambda_4(\phi_r - \phi) - \lambda_3 \dot{\phi}) / \cos \phi; \\ u_\theta &= I_y(\lambda_4(\theta_r - \theta) - \lambda_3 \dot{\theta}) / \cos \theta.\end{aligned}\quad (29)$$

Чтобы получить желаемые управляющие воздействия верхнего уровня $F_r^{(i)}$, необходимо решить уравнения (2), (25), однако прямое решение системы (2) невозможно, поскольку полученная система линейных является неопределенной. Чтобы решить эту проблему, предположим, что задняя подвеска (3 и 4) не влияет на крен кузова:

$$y_3 F_s^{(3)} + y_4 F_s^{(4)} = 0. \quad (30)$$

IV. Устойчивость

При проектировании системы управления были использованы принципы и методы синергетической теории управления, которые базируются на введение в пространство состояния исследуемой системы набора целевых многообразий, отражающих требования к проектируемой системе. В нашем случае изображающая точка замкнутой системы (1), (29) неизбежно попадает в окрестность пересечения целевых многообразий

$$\psi_L^{(i)} = 0; \psi_\theta = 0; \psi_z = 0; \psi_\phi = 0 \quad (31)$$

в силу устойчивости уравнений (23), (28). В соответствии с принципом расширения-сжатия фазового пространства [16] поведение замкнутой системы в окрестности пересечения инвариантных многообразий (31) описывается редуцированной моделью. Что позволяет при доказательстве устойчивости замкнутой системы ограничиться устойчивостью редуцированной модели.

В силу того, что порядок функциональных уравнений (28) равен двум, верхний уровень иерархии претерпевает полную декомпозицию и поведение системы на многообразии полностью определяется решением уравнений $\psi_z = 0, \psi_\phi = 0, \psi_\theta = 0$.

Для составления редуцированной модели нижнего уровня иерархии необходимо выразить переменную p_c из

уравнения $\psi_L^{(i)} = 0$ и подставить полученное решение в правые части уравнений (1), (11). Результатом этой операции является система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\ddot{z}_{us}^{(i)} &= \frac{2f_4 W V_n p_n}{-\cos^{-1}\left(\frac{r_n+z_{us}^{(i)}}{r_n}\right) W r_n^2 + W(r_n+z_{us}^{(i)}) f_4 + V_{-n}} + \\ &\quad + g m_i - F_r^{(i)} + f_2 - b \dot{z}_{us}^{(i)}; \\ \dot{p}_a^{(i)} &= -\frac{k c A \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{\rho} f_3 p_{pr} V_T^k} \left(\left(\frac{p_{pr} V_T^k}{p_a} \right)^{\frac{1}{k}} \right)^{-k-1}}{(f_3^2 + p_{cr}^2)^{\frac{1}{4}}},\end{aligned}\quad (32)$$

где $f_1 = \sqrt{\frac{2l_1 z_{us}^{(i)}}{1 + \left(\frac{z_{us}^{(i)}}{l_2} \right)^2} / l_2^2} + l_2 + l_1^2$;

$$f_2 = a \tan \left(\frac{\pi \left(\sqrt{f_1} - \sqrt{l_1^2 + l_2^2} \right)}{2 S_c^{max}} \right);$$

$$f_3 = p_a^{(i)} - \frac{\left(F_r^{(i)} - f_2 \right) f_1 \left(l_2^2 + \left(\frac{z_{us}^{(i)}}{l_2} \right)^2 \right)^2 l_1}{l_2^4 \left(-l_1 z_{us}^{(i)} + \left(\frac{l_2}{2} + l_1^2 - \frac{l_2^2}{2} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{z_{us}^{(i)}}{l_2} \right)^2 / l_2^2} \right)^{3/2}} - \eta l_1 \dot{z}_{us}^{(i)};$$

$$f_4 = \sqrt{-2r_n z_{us}^{(i)} - \left(z_{us}^{(i)} \right)^2}.$$

Для доказательства устойчивости системы (32) воспользуемся теоремой Ляпунова об устойчивости по первому приближению. С учетом параметров системы, представленных в табл. 1, найдем точку равновесия при условии отсутствия внешних возмущений:

$$z_{us}^{(i)} = -0,0102; \dot{z}_{us}^{(i)} = 0; p_a^{(i)} = 2,767 \cdot 10^6. \quad (33)$$

Якобиан системы (32) в точке равновесия (33) имеет вид:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -184968,591 & 0,328 \\ 1 & -1000 & 0 \\ 0 & 0 & -1,45271 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Собственными числами якобиана (34) являются: $p_1 = -1,452 \cdot 10^{-7}; p_2 = -244,987; p_3 = -755,01$. Так как действительная часть всех собственных чисел отрицательна согласно теореме Ляпунова об устойчивости по первому приближению, можно утверждать что единственное равновесное состояние системы (32) асимптотически устойчиво.

V. Анализ эффективности

Для исследования предлагаемой системы управления активной подвеской автомобиля используется численное моделирование системы в среде Simulink. В качестве модели дорожного покрытия используется белый шум с ограниченной полосой:

$$\dot{z}_r^{(i)} = f_k(\xi - z_r^{(i)}), \quad (35)$$

где $T = 1/(2\pi f)$; $f = 30$ Гц; ξ – белый шум с дисперсией σ^2 и нулевым математическим ожиданием. Параметры модели подвески автомобиля и исследуемой системы управления представлены в таблице 1.

Для оценки эффективности функционирования замкнутой системы используется среднеквадратичное ускорение кузова [1], что также отражает уровень комфорта пассажиров.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Параметр	Значение	Параметр	Значение
M	1750,5	I_x	550
I_y	1848	$x_1 = x_2$	1,0
$x_3 = x_4$	-1,4	$y_1 = y_4$	-0,6
$y_2 = y_3$	0,8	$\bar{l}^{(i)}$	0,2
$\bar{l}^{(i)}$	0,2	s_{c}^{\max}	0,04
m_i	50	W	0,175
r_n	0,295	p_n	$130 \cdot 10^3$
V_n	0,03288	b	1000
A_c	$1,256 \cdot 10^{-3}$	β	$2 \cdot 10^9$
ρ	870	V_T	0,4
$\lambda_1, \lambda_3, \lambda_5$	10	v	0,35
ϕ_r	0	$\lambda_2, \lambda_4, \lambda_6$	25
z_r	0	p_{pr}	$4,5 \cdot 10^6$
θ_r	0	c	0,7
V_0	$72,83 \cdot 10^{-6}$	A	$2 \cdot 10^{-9}$

В данной работе исследуются вертикальное ускорение и суммарное угловое ускорения кузова, рассчитываемое как $\ddot{a} = \sqrt{\dot{\phi}^2 + \dot{\theta}^2}$. В качестве объекта сравнения выступает аналогичная система активной подвески, но с использованием аддитивного регулятора без учета кинематических ограничений, т.е. при $a = 0$, а также пассивная система амортизации, которая может быть получена из текущей модели положив что $u^{(i)} = 0$. Для более наглядной демонстрации отличий все оценки являются относительными. В качестве базовой системы выбрана пассивная система амортизации, таким образом для анализа эффективности используются следующие две метрики:

$$J_c = \frac{RMS(\ddot{z}_s)}{RMS(\ddot{z}_s^*)}; J_a = \frac{RMS(\ddot{a}_s)}{RMS(\ddot{a}_s^*)}, \quad (36)$$

где J_c – метрика вертикального ускорения; J_a – метрика углового ускорения; $(\cdot)^*$ – сигнал референсной (пассивной) системы.

На рис. 4, 5 показаны результаты расчета метрик J_c, J_a . Изучив полученные результаты, можно сделать вывод, что обе системы управления активной подвеской (с учетом и без учета кинематических ограничений) обеспечивают аналогичный уровень комфорта и значительно лучше, чем пассивная система подвески, в случае если дисперсия шума ξ не превышает $1,05625 \cdot 10^{-5}$. Когда дисперсия превышает $1,05625 \cdot 10^{-5}$ обе системы активной подвески начинают терять эффективность. Система управления активной подвеской, синтезированная без учета ограничений теряет эффективность быстрее и при дисперсии выше $3,6 \cdot 10^{-5}$, уступает пассивной системе. Система управления активной подвеской, синтезированная с учетом конструктивных ограничений демонстрирует превосходство над пассивной системой во всей исследуемой области.

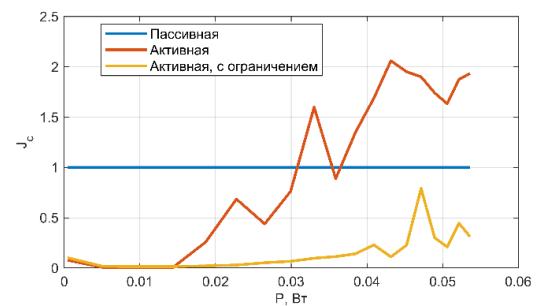


Рис. 4. Метрика J_c

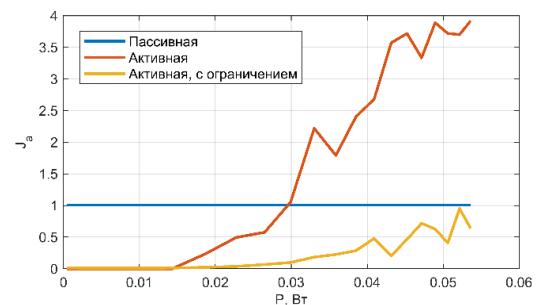


Рис. 5. Метрика J_a

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была составлена нелинейная модель подвески автомобиля, учитывающая кинематическую структуру и динамические характеристики гидроприводов. Предложен синергетический регулятор, позволяющий учесть ограничения на переменные состояния объекта управления, обусловленные его кинематической структурой. Предлагаемый закон управления гарантирует сохранение конструктивных ограничений подвески даже в условиях значительных возмущений и обеспечивает эффективное функционирование подвески в более широком диапазоне возмущающих воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hrovat D. Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications // Automatica. – 1994. – Vol. 33, No. 10. – P. 1781-1817.
2. Kim K., Doyoung J. Vibration Suppression in an MR Fluid Damper Suspension System // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 1999. – Vol. 10, No. 10, – P. 779-786.
3. Choi B.H., Han S.S. control of electrorheological suspensions system subjected to parameter uncertainties // Mechatronics. – 2003. – Vol. 13, No. 7. – P. 639-657.
4. Lai C.Y., Liao W.H. Vibration control of a suspension system via a magnetorheological fluid damper // Journal of Vibration and Control. – 2002. – Vol. 8, No 4, – P. 527-547.
5. Fischer D., Isermann R. Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions // Control Engineering Practice. – 2004. – Vol. 12, No. 11. – P. 1353-1367.
6. Isermann R. Mechatronic systems – innovative products with embedded control // Control Engineering Practice. – 2008. – Vol. 16. – P. 14-29.
7. Ahmadian M., Pare C.A. A quarter-car experimental analysis of alternative semiactive control methods // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2000. – Vol. 11, No. 8. – P. 604-612.
8. Fischer D., Borner M., Schmitt J., Isermann R. Fault detection for lateral and vertical vehicle dynamics // Control Engineering Practice. – 2007. – Vol. 15, No. 3. – P. 315-324.
9. Kuo Y.P., Li T.H.S. GA-based fuzzy PI/PD controller for automotive active suspension system // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1999 – Vol. 46, No. 6. – P. 1051-1056.

10. Taskin Y., Hacioglu Y., Yagiz N. The use of fuzzy-logic control to improve the ride comfort of vehicles // Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering. – 2007. – Vol. 53, No. 4. – P. 233-240.
11. Du H., Lam J., Sze K.Y. Design of non-fragile H_∞ controller for active vehicle suspensions // Journal of Vibration and Control. – 2005. – Vol. 11, No. 2. – P. 225-243.
12. Guchu R., Yagiz N. Comparison of different control strategies on a vehicle using sliding mode control // Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B. – 2004. – Vol. 28, No. B4. – P. 413-422.
13. Kim C., Ro P.I. A sliding mode controller for vehicle active suspension systems with non-linearities // Proceedings of the I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering. – 1998. – Vol. 212, No. 2. – P. 79-92.
14. Ylinen A., Marjamäki H., and Mäkinen J. A hydraulic cylinder model for multibody simulations // Computers and Structures. – 2014. – Vol. 138. – P. 62-72.
15. Korkmaz F. Hydrospeicher als Energiespeiche. – Berlin: Springer-Verlag, 1982. – 138 c.
16. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 343 с.
17. Kondratiev I., Dougal R., Veselov G., Kolesnikov A. Hierarchical control for electromechanical systems based on synergetic control theory // Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications. – 2009. – P. 495-500.
18. Веселов Г.Е. Синергетический подход к синтезу иерархических систем управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – № 6.

Синергетическое управление синхронным двигателем электромобиля с динамически меняющимися дорожными условиями

Олейников Константин Анатольевич

Институт компьютерных технологий

и информационной безопасности

Южный федеральный университет

Таганрог, Россия

koleynikov@sfedu.ru

Аннотация. В статье продемонстрирован синтез адаптивных регуляторов управления электро приводом электромобиля с использованием синхронного двигателя с постоянными магнитами. Рассмотрены стратегии управления синхронным двигателем с продольной динамикой электромобиля. Для процедуры синтеза регуляторов использован синергетический подход. В синтезе рассматривается разнообразный характер условий движения электромобиля, адаптивные алгоритмы подавления возмущений кусочно-постоянного типа на принципах интегральной адаптации, алгоритмы формирования тяги электромобиля и его взаимодействия с дорожным покрытием. Представлены результаты компьютерного моделирования и синтеза синергетического адаптивного закона управления.

Annotation. The paper demonstrates the synthesis of adaptive controllers for electric drive control using a permanent magnet synchronous motor. Strategies for controlling the synchronous motor with longitude dynamics of electric vehicle are considered. For the procedure of synthesis of regulators, a synergistic approach was used. The synthesis considers the diverse nature of the movement of an electric vehicle, the adaptive algorithms the suppression of disturbances of a piecewise constant type by the principles of integral adaptation, the algorithms for the formation of electric vehicle traction and its interaction with the road surface. The results of computer modeling and synthesis of a synergistic adaptive control law are presented.

Ключевые слова: электромобиль, нелинейные системы, адаптивные системы, синергетического теория управления, метод АКАР, инвариант, СДПМ, интегральная адаптация

Keywords: electric vehicle, nonlinear systems, adaptive systems, synergistic control theory, ADAR method, invariant, PMSM, integral adaptation

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технологии гибридных и полностью электрического транспорта становится все более распространенной и стремительно завоевывают рынок. По прогнозам, менее чем через 20 лет [1] доля электромобилей составят более трети всего автомобильного рынка, и в будущем это количество будет только увеличиваться. Следовательно, чрезвычайно важно разрабатывать и распространять технологии материалов, двигателей, силовой электроники и систем управления элек-

тромобилями, которые могут улучшить их производительность за счет увеличения их надежности и дальности хода на одном заряде аккумуляторной батареи [2]. В статье рассматриваются методы управления одним из наиболее распространенных приводов электромобилей – синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ), описывается синтез принципиально нового класса регуляторов – синергетического, гарантирующего выполнение задач управления, таких как поддержание скорости движения электромобиля, контроль тяги на желаемых значениях, который полностью учитывает динамику системы без линеаризации и обеспечивает устойчивость системы к изменениям различных параметров, адаптивность к различным типам возмущений и асимптотическую устойчивость системы в целом.

II. ДИНАМИКА АВТОМОБИЛЯ

Общая структура показанной системы управления электромобилем включает в себя: подсистему движения транспортного средства. Подсистема движения состоит из контроллера транспортного средства, преобразователя энергии с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), шины постоянного тока, электродвигателя, электродвигателя, автономного инвертора напряжения (АИН). В подсистему источника энергии входят модуль управления распределением энергии, аккумулятор, системы электроснабжения: климат-контроль, гидроусилитель руля, вспомогательные системы. При проектировании эффективной системы управления электромобилем необходимо правильно описать динамику движения автомобиля в соответствии с действующими на него силами. Общая продольная динамика сил, действующих на наклонную дорогу, представлена на рис. 1 [3].

Как показано на рис. 1 транспортное средство приводится в действие под действием 4-х сил: F_t – тяговая сила двигателя, F_{aero} – аэродинамическая сила, F_{roll} – сила сопротивления качению and F_g – гравитационная сила.

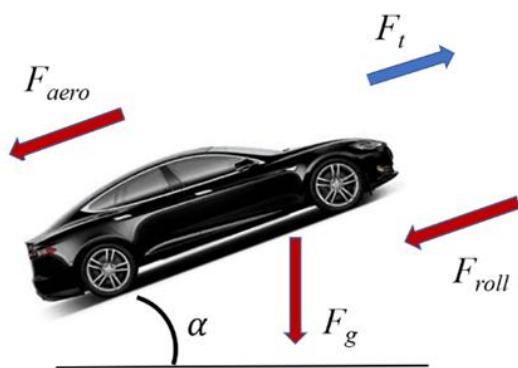


Рис. 1. Продольная динамика сил автомобиля

F_t – основная движущая сила электромобиля, пропорциональная скольжению между шиной и дорогой. Она зависит от характеристик шины и дорожного покрытия, имеет нелинейный характер и может быть равна нормированной функции в линейной области [3]:

$$F_t = \mu_{s0} s_x mg \cos(\alpha), \quad (1)$$

где μ_{s0} – коэффициент продольного трения в зависимости от типа дороги, m – это масса транспортного средства, включая все нагрузки в автомобиле, g – это ускорение свободного падания, α – это угол наклона дороги, s_x – это скорость скольжения колес и может быть описана как разница между скоростью вращения колеса и скоростью транспортного средства:

$$s_x = (r_w \omega_w - V_x) / r_w \omega_w, \quad (2)$$

где V_x – скорость транспортного средства, ω_w – угловая скорость колеса, r_w – радиус колеса [3]. Согласно экспериментальным результатам [4] сила тяги увеличивается до тех пор, пока проскальзывание не достигнет значения около 20%, и для максимального значения тягового усилия следует поддерживать это значение в диапазоне от 0 до 0,2, чтобы достичь максимальной тяги электропривода транспортного средства.

Вторая сила F_{aero} – это аэродинамическая сила, зависящая от аэродинамических параметров транспортного средства и окружающей среды. Ее можно описать как:

$$F_{aero} = 0.5 \rho C_d A_F (V_x + V_{wind})^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха, C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления, V_{wind} – скорость ветра для движущегося транспортного средства, A_F – лобовая площадь транспортного средства [3].

Сила сопротивления качению описывает процессы деформации шины с дорогой при выходе из зоны контакта шины с дорожным полотном [3], [4]. Она зависит от веса транспортного средства и обычно при отсутствии нагрузки пропорциональна нормальной силе, действующей на шину и может быть выражена через:

$$F_{roll} = k_r mg \cos(\alpha), \quad (4)$$

где k_r – коэффициент сопротивления качению шины. Как и μ_s он также зависит от типа дороги и немного зависит от скорости транспортного средства, но его зависимость от скорости движения очень мала, поэтому обычно при моделировании влияние скоростная зависимость игнорируется [3]. Типичные значения и в зависимости от различных типов дороги, давления в шинах, их материала и так далее [5, 6].

Последнюю, гравитационную силу можно описать известной в физике формулой:

$$F_g = mg \sin(\alpha). \quad (5)$$

Принимая во внимание все уравнения (1) – (5), окончательное уравнение, полностью описывающее продольную динамику транспортного необходимую для синтеза закона управления, может быть описано через 2-й закон Ньютона как:

$$m \frac{dV_x}{dt} = F_x, \quad (6)$$

где F_x – результирующая сила долготной динамики, которую можно рассчитать как сумму сил, описанных на предыдущем шаге: $F_x = F_t - F_{aero} - F_{roll} - F_g$.

III. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

Сердцем любого электромобиля является тяговый электропривод, который обеспечивает преобразование электрической энергии от источника питания в механическую энергию, приводящая электромобиль в движение. Можно выделить ряд требований к электроприводу электромобиля, обеспечивающему комфортное и безопасное вождение [5]:

- Высокий КПД двигателя и его удельная мощность.
- Широкий диапазон регулирования скорости, включая ускорение и торможение, особенно в городском режиме движения.
- Высокий КПД двигателя при различных изменениях нагрузки, при спусках и подъемах, изменениях типа дороги и т. д.

Наиболее пригодными с точки зрения этих характеристик являются асинхронные двигатели и синхронные двигатели. Синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) становится все более распространенным в областях, где ранее использовались традиционные двигатели постоянного тока и асинхронные двигатели по причине снижения стоимости магнитных материалов, а также улучшения совершенствование цифровых систем управления. С появлением соответствующих высокопроизводительных преобразователей, а также развитием кремниевой [5] и будущей квантовой технологии полупроводников [7, 8] актуально использовать СДПМ в качестве альтернативы двигателям постоянного и асинхронного тока в управляемом тяговом электроприводе. Существенное развитие дало внедрение преобразователей с биполярным транзистором с изолированным затвором и использующими принципы широтно-импульсного (ШИМ) регулирования [9].

С развитием технологий полупроводниковой электроники и цифровой базы также развиваются методы управления электроприводами сложных объектов управления, таких как электромобиль. Направление развития принципов управления СДПМ во многом определяется развитием аппаратной базы привода: параметрами самого двигателя, типом преобразователя, наличием датчиков угла – энкодеров и (или) скорости, а также цифровой вычислительной мощности и разрядности контроллера.

Отсутствие датчиков магнитного состояния и координат механического движения (скорости, положения ротора) имеет решающее значение при построении системы управления СДПМ. По этому критерию методы управления СДПМ можно разделить на управление с использованием «датчика положения ротора» и управление без использования, которое получило название «бездатчиковое управление» [10]. Преимущества бездатчиковых систем - надежность, низкая стоимость, компактность. Большинство систем на его основе используют методы оценки наблюдаемых переменных состояния электропривода. Эти методы отличаются друг от друга точностью расчета и чувствительностью к изменению параметров наблюдателя математической модели. Эти методы в большинстве случаев являются адаптивными, в них используются эталонные и пользовательские модели, что расширяет их функциональность. Современные методы и стратегии проектирования самих систем управления для СДПМ также отличаются разнообразием, наиболее известными из них являются [11]:

- Управление с использованием нейронных сетей и нечеткой логики
- Скользящие режимы управления
- Прямое управление моментом (ПУМ)
- Синергетическое управление
- Робастное управление (H^∞ теория)
- Полеориентированное управление (ПОУ)

У каждого метода управления есть плюсы и минусы. Минусы наиболее часто используемых ПОУ [12] – сложная процедура настройки параметров ПИД-регуляторов сепаративных каналов управления, необходимость компенсации перекрестных связей через каналы управления, что обычно сводится к упрощению, линеаризация и другим приемам, влияющим на точность процесса регулирования и достижения необходимых параметров качества регулирования [11]. Метод ПУМ характеризуется большими колебаниями скорости ротора, особенно при малых углах нагрузки и колебаниях крутящего момента [13].

Существуют также различные стратегии управления током, такие как управление моментом на ампер (МРТА), управление максимальной мощностью (МРС), управление максимальным крутящим моментом / магнитным потоком и т.д., использование которых позволяет достичь максимальной производительности электропривода [14].

A. Математическая модель СДПМ

Возьмем известную математическую модель двигателя СДПМ [15] в ортогональной синхронной системе координат (d, q) , ось d которой ориентирована вдоль

магнитной оси ротора и вращается вместе с ней. Модель можно описать в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \omega_r, \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1.5p(\psi_f I_q + (L_d - L_q)I_d I_q) - M_c - \beta\omega_r}{J}, \\ \frac{dI_d}{dt} &= \frac{U_d - R_s I_d + \omega_r L_q I_q}{L_d}, \\ \frac{dI_q}{dt} &= \frac{U_q - R_s I_q - \omega_r L_d I_d - \omega_r \psi_f}{L_d}, \end{aligned} \quad (7)$$

где θ – положение ротора, ω_r – скорость ротора, p – число пар полюсов, ψ_f – потокосцепление ротора, R_s – сопротивление статора, L_d и L_q – индуктивности по осям d и q соответственно, I_d и I_q – проекции токов на оси d и q , U_d и U_q – напряжения на оси d и q , J – момент инерции, M_c – нагруженный момент, β – коэффициент демпфирования.

U_d и U_q – каналы управления системы (7). ω_r также связана с ω_w через соотношение $\omega_r = n \cdot \omega_w$ где n – передаточное число редуктора мотора к колесам.

B. Процедура синергетического синтеза

Для процедуры синтеза был выбран принципиально новый современный метод управления, основанный на принципах самоорганизации и кибернетики - синергетический синтез управления [16, 17].

Из теории синергетического управления известно, что набор критериев управления системой выражается как система инвариантных многообразий, которые определяют желаемое поведение системы [16]. СДПМ как объект управления имеет два канала управления: U_d и U_q , поэтому в базовом случае для него можно указать два инварианта стабилизации: технологический инвариант скорости вращения ротора $\omega_r (\omega_r = \omega_r^0)$ и электромагнитный инвариант зануления продольной составляющей тока статора $I_d = 0$. Синергетическое регулирование осуществляется с использованием метода аналитического проектирования агрегированных регуляторов (АКАР). Этот метод широко используется в электромеханических системах, включая электроприводы и электромобили, для синтеза быстрых и точных законов управления [18], [19]. Достоинством метода является высокая точность, использование полной математической модели без линеаризации, отсутствие проблемы «проклятия размерности каналов управления». Недостатком является сложность вычислений, значительное время обработки данных, жесткая зависимость от параметров математической модели управления объектом.

Рассмотрим процедуру синтеза более подробно. Поскольку мы используем регулятор в системе управления электромобилем, мы выберем целью стабилизацию скорости движения электромобиля на желаемом значении

$V_x (V_x = V_x^0)$ в качестве технологического инварианта и аннулируем одну проекцию тока $I_d = 0$ как электромагнитную. В соответствии с принципами АКАР поскольку мы имеем 2 канала управления, мы можем установить первую пару инвариантных многообразий, где одно будет решать одну из наших задач, а другое будет разлагать нашу систему (7), заменив один из каналов управления неизвестной на данный момент функцией [20, 21]. ϕ_1 [20, 21].

$$\begin{aligned}\psi_1 &= I_d - I_d^* = 0, \\ \psi_2 &= I_q - \phi_1(x_1, x_2) = 0.\end{aligned}\quad (8)$$

Когда изображающая точка системы входит в окрестность инвариантного многообразия, в замкнутой системе (7) с применением (8) происходит декомпозиция системы, то есть уменьшение ее размерности, поведение которой будет описываться следующей системой дифференциальных уравнений с учетом динамики электромобиля (5):

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= \omega_r; \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1.5 p(\psi_f \phi_1 + (L_d - L_q) I_d^* \phi_1) - M_c - \beta \omega_r}{J}; \\ \frac{dV_x}{dt} &= \frac{F_x}{m},\end{aligned}\quad (9)$$

На основе полученной системы (9) синтезируем «внутренний» закон управления. Теперь необходимо стабилизировать скорость автомобиля, которая в системе обозначена как V_x . Соответственно, с системой (8) и необходимым условием стабилизации скорости движения электромобиля вводится новая макропеременная:

$$\psi_3 = \frac{F_x}{m} - k_1(V_x - V_x^*) = 0,\quad (10)$$

где k_1 – коэффициент усиления, который должен при $k_1 < 0$ обеспечивать асимптотическую устойчивость системы.

Чтобы найти внутренне управление ϕ_1 мы должны решить следующее основное функциональное уравнение (ОФУ):

$$T_3 \frac{d\psi_3}{dt} + \psi_3 = 0.\quad (11)$$

Когда мы найдем ϕ_1 мы можем получить выражения для законов управления U_d и U_q решив следующие ОФУ:

$$T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 = 0, \quad T_2 \frac{d\psi_2}{dt} + \psi_2 = 0,\quad (12)$$

где T_1, T_2, T_3 – параметры регулятора.

Решая (11) и (12), мы можем получить искомые выражения для закона управления и выполнить моделирование системы, но необходимо еще проверить аддитивные свойства системы.

C. Синергетический принцип интегральной адаптации

Объект управления постоянно подвергается различным внешним воздействиям-возмущениям, изменениям дорожного покрытия, уклонам, резистивным нагрузкам, которые имеют дестабилизирующий характер и выводят систему из желаемых показателей качества и равновесия. Параметры объекта управления в некоторых случаях также непостоянны, что приводит к нарушению работоспособности законов управления. Для синтеза законов управления и подавления типовых возмущений используется в нашем случае известный в синергетической теории управления принцип интегральной адаптации, [22]. Этот принцип представляет собой синтез регулятора и оценка возмущений, которые обеспечивают компенсацию возмущений различного типа и сложности. Под возмущениями будем понимать кусочно-постоянные возмущения вида: $M_i^{\text{sup}}(t) = M_{i0} \text{sign} \mu(t)$, где M_{i0} – случайное изменение коэффициента, $\mu(t)$ – знакопостоянная функция. Чтобы компенсировать эти возмущения для синтеза регулятора с необходимыми показателями качества и подавления возмущений, необходимо включить в систему уравнений дополнительное звено – интегратор, реализуя тем самым астатический закон управления [23].

По принципу интегральной адаптации система (7) дополняется оценкой возмущений и дополнительным уравнением в системе для синтеза законов внутреннего управления, расширяющие эталонную модель. Тогда математическая модель (7) примет вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= \omega_r; \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1.5 p(\psi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) - \beta \omega_r}{J}; \\ \frac{dI_d}{dt} &= \frac{U_d - R_s I_d + \omega_r L_q I_q}{L_d}; \\ \frac{dI_q}{dt} &= \frac{U_q - R_s I_q - \omega_r L_d I_d - \omega_r \psi_f}{L_d}; \\ \frac{dV_x}{dt} &= \frac{F_x - z_1}{m}; \\ \frac{dz_1}{dt} &= k_1(V_x - V_x^0).\end{aligned}\quad (13)$$

где z_1 – оцениваемое внешнее возмущение. Для синтеза астатического аддитивного закона управления необходимо модернизировать закон управления, изменив 3-ю макропеременную (10):

$$\psi_3 = \frac{F_x}{m} - k_1(V_x - V_x^*) + k_2 z_1 = 0,\quad (14)$$

где k_2 – астатический коэффициент усиления, который обеспечивает подавление ошибки при желаемом значении скорости электромобиля V_x .

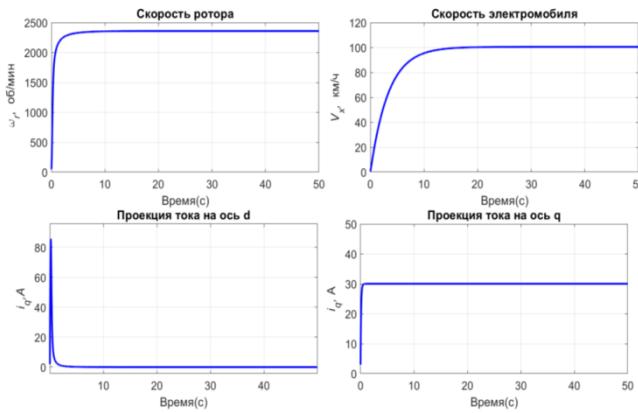


Рис. 2. Переходные процессы разгона электромобиля

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Для тестирования и моделирования синергетического закона мы используем пакет компьютерного моделирования Maple для синтеза закона управления и Matlab для моделирования системы.

Цель управления: поддержание значений скорости движения электромобиля $V_x^* = 100 \text{ km/h}$ и $I_d^* = 0$.

Параметры регулятора: $T_1 = 0.01$, $T_2 = 0.5$, $T_3 = 0.5$, $k_1 = -0.3$, $k_2 = -0.001$.

Параметры электромобиля: $m = 1000 \text{ кг}$, $\rho = 1.225 \text{ кг/m}^3$, $A_F = 2.3 \text{ м}^2$, $C_d = 0.24$, $n = 3.5$, $r_w = 0.4$, $k_r = 0.015$, $\mu_{s0} = 0.9$ (сухой асфальт), $\alpha = 0$.

Параметры двигателя: $P = 7.5 \text{ кВт}$, $p = 4$, $\beta = 0$, $L_d = 2.25 \text{ ГН}$, $L_q = 5.25 \text{ ГН}$, $\psi_q = 0.183 \text{ Вб}$, $J = 0.013 \text{ кг/м}^2$, $M_c : const = 100$.

Базовый сценарий вождения заключается в ускорении электромобиля ($V_x^* = 100 \text{ km/h}$) и поддержание желаемого значение в течение всего периода времени. Рис. 2 показывает переходные процессы переменных ω_r , V_x , I_d и I_q . Задача с технологическими и электромагнитными инвариантными многообразиями полностью удовлетворены результатами моделирования. $V_x^* = 100 \text{ km/h}$, $I_d^* = 0$.

Следующая- проверить адаптивность синтезированного закона управления с различными дорожными условиями движения. Для этого случая был выбран следующий сценарий движения:

При $0 < t < 15$ движение по прямой ($\alpha = 0$);

При $15 < t < 25$ движение в уклон ($\alpha = +15^\circ$);

При $25 < t < 35$ движение по прямой ($\alpha = 0$);

При $35 < t < 45$ движение с уклона ($\alpha = -15^\circ$);

При $45 < t < 50$ движение по прямой ($\alpha = 0$).

Также в период $5 < t < 10$ тип покрытия изменен с сухого асфальта на мокрый асфальт ($\mu_{s0} = 0.6$, $k_r = 0.05$) и момент нагрузки M_c также менялся в различных значе-

ниях. Задача такая же: поддержание скорости движения электромобиля $V_x^* = 100 \text{ km/h}$ на всем промежутке времени. Результаты моделирования показаны на рис. 3.

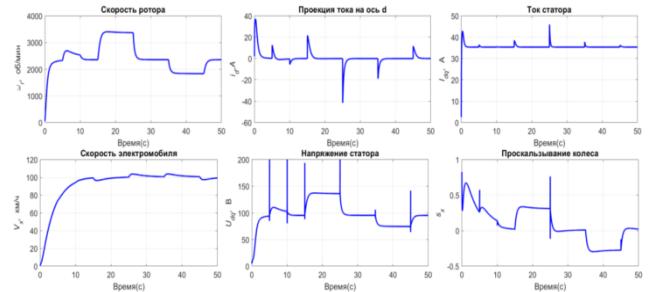


Рис. 3. Переходные процессы ездового сценария

Несмотря на широкое изменение условий, включая нагрузку, углы наклона, тип поверхности, синтезированный адаптивный синергетический регулятор справляется с поставленной задачей и удерживает необходимое значение скорости электромобиля. Статическая погрешность менее 5%, что в совокупности с серьезным изменением условий во времени является хорошим показателем и свидетельствует о адаптивных свойствах синтезированного регулятора. Для получения лучших результатов мы можем установить более точные параметры контроллера, чтобы уменьшить скачки напряжения, пульсации, и достичь большей точности и производительности для регулятора.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной был синтезирован синергетический регулятор для адаптивного управления синхронным двигателем электромобиля с различными условиями дорожного движения. Была описана продольная динамика движения автомобиля, современные методы управления СДПМ и подробно описана процедура одного из современных методов - синергетического подхода и с использованием метода АКАР. Задача по поддержанию заданного значения скорости автомобиля успешно решена. Синтезированный закон управления обеспечивает быстрое исполнение поставленной задачи, точность и хорошие адаптивные свойства при различных изменениях сопротивления нагрузки, возмущений, устойчивости. Будущая работа будет включать в себя синтез бездатчикового управления с нелинейными наблюдателями, добавление боковой динамики к транспортному средству, усложнение сценариев вождения и интеграцию результатов с другими компонентами системы электрического транспортного средства: инверторами, преобразователями, траекторного управления для синтеза полной иерархической системы управления

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Martinez C.M., Hu X., Cao D. Energy Management in Plug-in Hybrid Electric Vehicles: Recent Progress and a Connected Vehicles Perspective // Proceedings in IEEE Transactions on Vehicular Technology. – June, 2017. – Vol. 66, No. 6. – P. 4534-4549,
2. Ehsani M., Gao Y., Emadi A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel cell Vehicles. – 2nd ed. – CRC press, 2010. – 353 p.
3. Nam K.H. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. – CRC Press, 2019. – 654 p.
4. Wong J.Y. Theory of Ground Vehicles, Wiley-Interscience. – 3rd. ed. – 2001. – 428 p.

5. *Veltman A., Pulle D.W.J., Doncker R.W.* Fundamentals of Electrical Drives. – Eindhoven: Springer, 2007. – 341 p.
6. *Kots I.N.* Studying the Regimes of Silicon Surface Profiling by Focused Ion Beams // Russian Microelectronics. – 2019. – Vol. 48, No. 2. – P. 72-79.
7. *Pljonkin A., Gupta B., Rumyantsev K., Korovin I.* Features of detection of a single-photon pulse at synchronisation in quantum key distribution systems // Proceedings of 6th International Conference on Informatics, Electronics and Vision & 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology. – P. 1-5.
8. *Pljonkin A., Singh P.* The Review of the Commercial Quantum Key Distribution System // Proceedings of Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing. – 2018. – P. 795-799.
9. *Chau K.T., Chan C.C. Liu and Overview C.* of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles // Proceedings in IEEE Transactions on Industrial Electronics. – June, 2008. – Vol. 55, No. 6. – P. 2246-2257.
10. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. – М.: Изд-во Высшая школа, 1994. – 327 с.
11. *Popov A.N.* Design of Energy-efficient Regulators for Vector Control Systems of Induction Motor of an Electric Vehicle Propulsion System Proceedings of III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), St. Petersburg, 30.10.2019. – P. 81-84.
12. *Blaschke F.* The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines // Siemens Rev. – 1972. – Vol. 34, No. 1. – P. 217-220.
13. *Messaoudi M., Kraiem H., M. Sbita L.* A Robust Sensorless Direct Torque Control of Induction Motor Based on MRAS149 and Extended Kalman Filter // Leonardo Journal of Sciences. – 2005. – No. 12. – P. 35-56.
14. *Salmasi F.R.* Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends // Proceedings in IEEE Transactions on Vehicular Technology. – Sept. 2007. – Vol. 56, No. 5. – P. 2393-2404.
15. *Pillay P., Krishnan R.* Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive // Proceedings in IEEE Transactions on Industry Applications. – March-April 1989. – Vol. 25, No. 2. – P. 265-273..
16. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
17. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами. – М. : Либроком, 2012. – 240 с.
18. *Oleinikov K.* A Synergetic Energy-saving Approach for Electric Vehicle Motion Control // Proceedings of III International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – St. Petersburg, Russia, 2019. – P. 73-76.
19. *Popov A.N.* "Energy-saving Regulators for Asynchronous Electric Drive Vector Control Systems: Design Procedure and Adaptive Control*", 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 2019. – P. 1-4.
20. Современная прикладная теория управления. Синергетический подход в теории управления. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – Т. II. – 559 с.
21. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – Т. III. – 656 с.
22. *Kuz'menko A.A., Sinitsyn A.S., Mushenko A.S.* The use of integral adaptation principle to increase the reliability of “DFIG – Wind turbine” power system // Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana. – 2017. – P. 1-6.
23. *Kuz'menko A.A., Synitsin A.S., Zyryanova A.A.* The use of integral adaptation principle to increase the reliability of synchronous generator nonlinear excitation system // Proceedings of 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – St. Petersburg, 2014. – P. 415-420.

Синтез нелинейных адаптивных законов управления пневмоприводом при неконтролируемых возмущениях

Обухова Елена Николаевна

Донской государственный технический университет
Ростов-на-Дону, Россия
elenab21@spark-mail.ru

Аннотация. В настоящее время, задача синтеза эффективных законов управления пневмоприводом, обладающих адаптационными свойствами к внешним возмущениям, является достаточно актуальной. Совершенно очевидно, что в реальных условиях эксплуатации на систему управления будут воздействовать некоторые внешние возмущающие факторы, действие которых может значительно отклонить желаемое изменение управляемой величины. Целью данной работы является разработка адаптивного нелинейного синергетического закона управления для подавления возмущающего воздействия, которое было задано и аддитивно введено в математическую модель в виде определенных математических функций. Синтез адаптивного закона управления проводился посредством метода интегральной адаптации, входящего в концепцию синергетической теории управления. Полученные результаты компьютерного моделирования подтверждают адаптационные свойства полученных нелинейных синергетических законов управления и достижения поставленной технологической цели управления – перемещение штока в заданное положение в условиях действия возмущений.

Annotation. Currently, the problem of synthesizing effective pneumatic drive control laws that have adaptive properties to external disturbances is quite relevant. It is quite obvious that in real operating conditions the control system will be affected by some external disturbing factors, the action of which can significantly reject the desired change in the controlled value. The purpose of this work is to develop an adaptive nonlinear synergetic control law for suppressing the disturbing effect, which was specified and additively introduced into the mathematical model in the form of certain mathematical functions. The synthesis of the adaptive control law was carried out using the method of integral adaptation, which is part of the concept of synergetic control theory. The obtained results of computer modeling confirm the adaptive properties of the obtained nonlinear synergetic control laws and the achievement of the set technological control goal - moving the rod to a given position under the conditions of disturbances.

Ключевые слова: пневмопривод, инвариантные многообразия, фазовые переменные, возмущение, интегральная адаптация.

Keywords: pneumatic drive, invariant manifolds, phase variables, disturbance, integral adaptation.

I. ВВЕДЕНИЕ

Использование пневмоприводов в различных сферах промышленной автоматизации обусловлено такими достаточно высокими эксплуатационными показателями как надежность, быстродействие, низкая стоимость, доступность использования в условиях высокой влажности, а также во взрыво и пожароопасных средах. С точки зрения рационального использования энергии, применение пневмоприводов является наиболее предпочтительным, по сравнению с другими исполнительными устройствами потребляющими иной вид энергии, за счет работы сжатого воздуха, имеющего низкую себестоимость. Однако, физическое свойство сильной сжимаемости воздуха, усложняет процесс замкнутого управления электропневматической системой.

В настоящее время технологическая актуальность задачи управления электропневматической системой, связана с точным и плавным торможением поршня пневмопривода в заданной координате его траектории в различных режимах работы системы в условиях внешних возмущающих факторов.

Для исследования моделей с неопределенными параметрами в условиях внешних возмущений применяют специальные методы робастного и адаптивного управления.

В работе [1] робастные свойства пневматической системы обеспечиваются введением динамической обратной связи по положению штока привода, так же предлагается использование адаптивного нейросетевого динамического контроллера для оценки внешних возмущений.

В работах [2, 3] представлен адаптивный робастный регулятор, основанный, на введении обратной связи, которая повышает способность отслеживания траектории выходного звена. Была доказана устойчивость разработанного адаптивного регулятора по методу функции Ляпунова.

В работах [4, 5] рассматривается построение регулятора на основе косвенного адаптивного робастного управления, содержащего расширенный наблюдатель возмущений. При этом адаптивный закон управления позволяет оценить не только влияния возмущений, но и неопределенные параметров.

В работе [6] была разработана гибридная нечеткая адаптивная схема управления пневмоприводом с эталонной моделью. Управление основано на мультиплексивной адаптации сигнала с линейным регулятором в прямом направлении и нечетким регулятором в адаптивном контуре обратной связи. Подобный принцип управления относится к методу прямой адаптации с эталонной моделью, который объединяет регулятор и алгоритм его адаптации одной целью – уменьшению сигнала ошибки по положению эталонной модели пневмопривода.

В основе рассмотренных выше работ лежит либо принцип косвенной адаптации, либо принцип адаптации на основе эталонной модели или управления скользящим режимом.

Принцип косвенной адаптации имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что цель работы синтезируемого адаптивного регулятора расходится с целью построенного наблюдателя, вследствие чего управление по выходной координате оказывается разомкнутым, что естественным образом влияет на ошибку управления.

В адаптивном управлении на основе построения эталонной модели описанный выше недостаток устраняется. Это осуществляется за счет построения блока эталонной модели, вырабатывающей желаемое значение регулируемого параметра управления.

Однако в данном принципе управления, построение эталонной модели основывается на линейной модели исследуемой системы, что, на наш взгляд, является существенным недостатком. При этом введение в систему блока эталонной модели усложняет процесс управления, возникают не контролируемые ошибки. Заметим, что в адаптивном управлении скользящим режимом также рассматриваются линейные модели, представленные в матрично-векторной форме.

В данной статье предлагается синтез адаптивных нелинейных синергетических законов управления, в основе которыхложен метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов синергетической теории управления [7–9], разработанный А.А. Колесниковым. При этом адаптивные свойства системы управления к рассматриваемому внешнему воздействию достигаются за счет введения принципа интегральной адаптации СТУ синергетической теории управления [10–13].

II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

На рис. 1 приведена расчетная принципиальная схема электропневматической системы, состоящая из пневмопривода двустороннего действия и двух независимых пневмораспределителями (ПР) с электропневматическим управлением.

В пневмоцилиндре двустороннего действия с двумя полостями, связанными с атмосферой, поршень может свободно перемещаться по всей длине хода в двух направлениях.

Сжатый воздух под давлением p_m и температурой магистрали T_m поступает в полость наполнения пневмоцилиндра из ПР1, при этом порт ПР2 соединяется с атмосферой давлением p_a .

Давление сжатого воздуха p_1 , воздействует на бесштоковую поверхность поршня площадью S_1 , создавая при этом усилие, которое перемещает поршень на расстояние l , со скоростью V , позволяя таким образом получить перемещение выходного звена массой M .

Объемы полостей пневмоцилиндра состоят из рабочего объема, который меняется в зависимости от положения поршня и начального, неизменяющегося объема который представляет собой пространство между крышкой и поршнем, находящимся в конце хода и имеющим координату положения l_{0i} .

Сопротивление пневматической линии пневмопривода определяется коэффициентом ξ , который равен суммарным сопротивлениям входящих в линию пневмоэлементов и сопротивлением отдельных участков трубопровода.

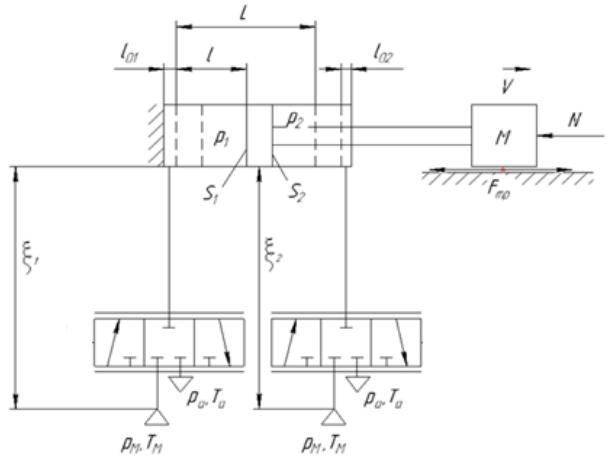


Рис. 1. Расчетная схема ЭПС

Кинетическая энергия, сообщенная механическому объекту управления во время разгона, должна быть уменьшена или сведена к нулю прежде, чем поршень достигнет конца хода, иначе это может вызвать повреждение конструкции цилиндра или связанных с ним механизмов.

Эффективно снизить кинетическую энергию в конце хода движения при торможении пневмоцилиндра позволяет ПР, который обеспечивает уменьшение площади сечения отверстия для сброса воздуха в атмосферу. Таким образом, уменьшение площади проходного сечения приводит к созданию воздушной подушки в конце хода, приводящей к увеличению давления воздуха в выхлопной полости и, как следствие, изменению знака ускорения и последующему уменьшению скорости, определяющей фазу торможения поршня, штока и связанными с ним объектами.

Математическая модель электропневматической системы, состоит из уравнения движения механической части устройства, а также из уравнений, характеризующих термодинамические и газодинамические процессы, происходящие в полостях цилиндра [14–16]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2; \\ \dot{x}_2(t) = a_{21} \cdot x_3 - a_{22} \cdot x_4 - a_{23} \cdot x_2 - a_{24}; \\ \dot{x}_3(t) = \left[a_{31} \cdot (x_1 + l_{01})^{-1} \cdot U_{1f} \cdot \sqrt{p_m^2 - x_3^2} \right] - \frac{kx_3 x_2}{(x_1 + l_{01})}; \\ \dot{x}_4(t) = - \left[a_{41} \cdot (a_{42} - x_1)^{-1} \cdot U_{2f} \cdot \left(\frac{x_4}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - p_a^2} \right] + \frac{kx_4 x_2}{(a_{42} - x_1)}. \end{cases} \quad (1)$$

В математическую модель для упрощенного представления и дальнейшего анализа введены следующие коэффициенты: $a_{21} = \frac{S_1}{M}$; $a_{22} = \frac{S_2}{M}$; $a_{23} = \frac{k_{\text{втр}}}{M}$; $a_{24} = \frac{P_a(S_1-S_2)}{M}$; $a_N = \frac{N}{M}$; $a_{31} = \frac{k\sqrt{RT_m}}{S_1\sqrt{\xi}}$; $a_{41} = \frac{k\sqrt{RT_m}}{S_2\sqrt{\xi}}$; $a_{42} = (L + l_{02})$.

В модели следующие параметры обозначены как: x_1 – координата перемещения поршня l (m); x_2 – скорость перемещения движущихся масс V (m/s); x_3 – давление в камере наполнения p_1 (Pa); x_4 – давление в камере выхлопа p_2 (Pa); M – масса подвижной части поршня и штока (0,5 кг); S_1 и S_2 – эффективные площади поршневой и штоковой полостей пневмоцилиндра ($8 \cdot 10^{-4} m^2$ и $6 \cdot 10^{-4} m^2$); $k_{\text{втр}}$ – коэффициент вязкого трения (100 $N \cdot s/m$); T_m – абсолютная температура газа (293 К); k – показатель адиабаты для воздуха (1,4); R – универсальная газовая постоянная (287 $J/(kg \cdot K)$); l_{01} и l_{02} – начальная и конечная координаты положения поршня (0,002 m); ξ – суммарный коэффициент сопротивления входящих в линию дросселей (30); p_m – уровень давления на входе магистрали ($5 \cdot 10^5 Pa$); p_a – атмосферное давление ($10^5 Pa$).

Управлениями U_{1f} и U_{2f} являются площади поперечного сечения отверстий первого и второго пневмораспределителей которые находятся в правых частях математической модели.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЛИНЕЙНО-НАРАСТАЮЩЕМ ВОЗМУЩЕНИИ

Сформулируем задачу синтеза следующим образом: необходимо синтезировать такие управляющие воздействия U_{1f} и U_{2f} , которые позволяли бы достижения точки позиционирования штока x_1 при условии равновесия давлений в камерах наполнения и выхлопа, при этом обеспечивали инвариантность замкнутой системы к действию линейно-нарастающего возмущения.

Линейно-нарастающая, противодействующая движению поршня возмущающая сила возникает в технологических задачах где пневмопривод воздействует на объект с некоторым, требуемым усилием. К подобным процессам относят гибку, прессование, формование, запрессовку, и т.д. При этом возникающее сопротивление объекта, которое увеличивается пропорционально действующей силе штока, можно математически описать линейно-нарастающей во времени функцией. Технологический пример линейно-нарастающей силы представлен на рис. 2, 3.

Компенсировать внешние воздействия позволяет использование принципа интегральной адаптации синергетической теории управления [7–9], базирующегося на фундаментальных свойствах астатизма подавлять возмущения до полного исчезновения ошибки регулирования. Причем применение принципа интегральной адаптации позволяет подавлять возмущения без их оценки и измерения.

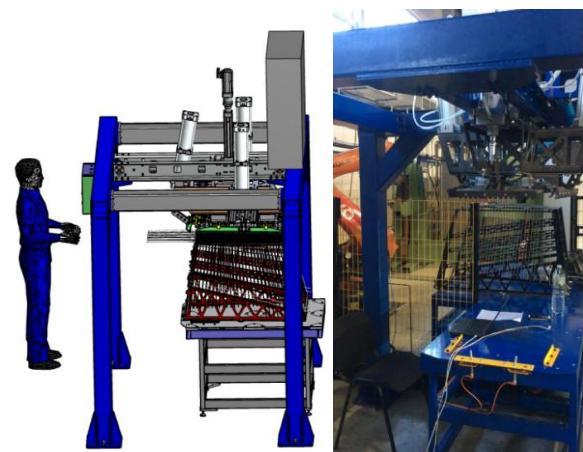


Рис. 2. Гибка каркасов продуктовых тележек

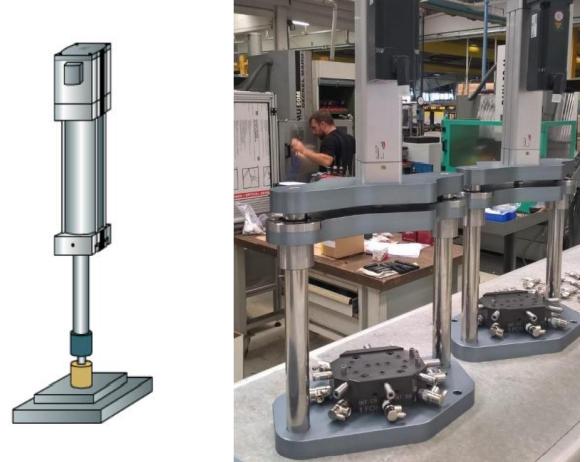


Рис. 3. Нанесение маркировки на изделие

Интегральная адаптация синергетической теории управления предполагает расширение фазового пространства путем введения в систему дифференциальных уравнений электропневматической системы дополнительных интеграторов, которые по сути формируют обратные связи системы, за счет которых и достигается результат подавления внешних возмущающих факторов.

Исходя из метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов расширим фазовое пространство пневматической системы введя в математическую модель интегральные соотношения переменных x_5 и x_6 , обеспечивающие подавление функции кусочно-линейного возмущения:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2; \\ \dot{x}_2(t) = a_{21} \cdot x_3 - a_{22} \cdot x_4 - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} + x_5; \\ \dot{x}_3(t) = \left[a_{31} \cdot (x_1 + l_{01})^{-1} \cdot U_{1f} \cdot \sqrt{p_m^2 - x_3^2} \right] - \frac{kx_3 x_2}{(x_1 + l_{01})}; \\ \dot{x}_4(t) = - \left[a_{41} \cdot (a_{42} - x_1)^{-1} \cdot U_{2f} \cdot \left(\frac{x_4}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{x_4^2 - p_a^2} \right] + \frac{kx_4 x_2}{(a_{42} - x_1)}; \\ \dot{x}_5(t) = x_6; \\ \dot{x}_6(t) = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \quad (2)$$

Введем «термодинамическое» инвариантное многообразие ψ_1 , отражающее равновесие давлений в камерах пневмоцилиндра в конце хода поршня и «технологическое» инвариантное многообразие ψ_2 являющееся функцией равновесия давления в камере наполнения, порож-

дающего движение поршня и внутреннего управления, как сложной функции скорости, перемещения переменных расширенной системы:

$$\begin{cases} \psi_1 = x_4 - x_3 = 0, \\ \psi_2 = x_3 - \varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $\varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6)$ – внутреннее управление, которым является желаемое изменение давления в камере наполнения x_3 и непосредственно влияющее на скорость штока и его перемещение, с учетом возмущения.

Для устойчивого асимптотического движения системы из условно допустимой области фазового пространства к пересечению инвариантных многообразий (3) согласно методу аналитического конструирования агрегированных регуляторов ψ_1 и ψ_2 должны удовлетворять следующим функциональным уравнениям:

$$\begin{cases} T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0, \\ T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $T_1 > 0$ и $T_2 > 0$ постоянные времени, характеризующие длительность движения системы к инвариантным многообразиям.

При попадании системы на пересечение инвариантных многообразий (3) исходная система (2) преобразуется в следующий декомпозированный вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2, \\ \dot{x}_2(t) = (a_{21} - a_{22}) \cdot \varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6) - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} + x_5, \\ \dot{x}_5(t) = x_6, \\ \dot{x}_6(t) = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \quad (5)$$

Внутреннее управление φ_1 является сложной функцией, отражающей зависимость скорости от желаемого перемещения с учетом возмущения, поэтому введем следующее многообразие:

$$\psi_3 = x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_1 x_5 + b_2 x_6 = 0, \quad (6)$$

где b_1, b_2 и k – параметры синергетического регулятора, отвечающие за устойчивость движения на многообразии ψ_3 к цели управления.

Исследуем устойчивость введенного многообразия (6) в декомпозированной системе (5):

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = k(x_1 - x_1^*) - b_1 x_5 - b_2 x_6, \\ \dot{x}_5(t) = x_6, \\ \dot{x}_6(t) = \beta(x_1 - x_1^*). \end{cases} \quad (7)$$

Для получения характеристического полинома линейной системы уравнений (7) найдем определитель ее матрицы состояний:

$$\begin{aligned} A(p) = \det(pE - A) &= \begin{vmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} k & -b_1 & -b_2 \\ 0 & 0 & 1 \\ \beta & 0 & 0 \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} (p - k) & b_1 & b_2 \\ 0 & p & -1 \\ -\beta & 0 & p \end{vmatrix} \\ &= p^3 - kp^2 + b_2\beta p + b_1\beta. \end{aligned} \quad (8)$$

Движение изображающей точки системы вдоль данного многообразия (6) будет асимптотически устойчиво при следующих значениях коэффициентов:

$k < 0, b_1, b_2 > 0$ и отрицательных значениях вещественных корней характеристического полинома:

$$\operatorname{Re} p_i < 0, i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Данные условия устойчивости будут учтены при выборе параметров регулятора в дальнейшем.

Функциональное уравнение обеспечивающее асимптотическую устойчивость движения к инвариантному многообразию (6):

$$T_3 \dot{\psi}_3(t) + \psi_3 = 0, \quad (10)$$

где постоянная времени $T_1 > 0$.

Совместно решая (6) с (10) с учетом (5) выражим $\varphi_1(x_1, x_2, x_5, x_6)$:

$$\varphi_1 = \frac{T_3(x_5 - kx_2 + b_1x_6 - a_{23}x_2 - a_{24}) + b_2x_6 + x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_1x_5}{T_3(a_{21} - a_{22})}. \quad (11)$$

Закон управления выраженный относительно площади поперечного сечения ПР1 и ПР2 находится из совместного решения (11) и (3) с учетом функциональных уравнений (4) и модели (2):

$$\begin{aligned} U_{1f} &= \frac{T_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 - \lambda_5) - x_3 - \lambda_6}{T_2 \lambda_3}, \\ U_{2f} &= \frac{T_1(\lambda_3 U_1 + \lambda_4 + \lambda_8) - x_4 + x_3}{-T_1 \lambda_7}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \lambda_1 &= \frac{kx_2}{T_3(a_{21} - a_{22})}; \lambda_2 \\ &= \frac{(T_3k + T_3a_{23} - 1)(a_{21}x_3 - a_{22}x_4 - a_{23}x_2 - a_{24} - z_f)}{T_3(a_{21} - a_{22})}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= \frac{a_{31}\sqrt{p_m^2 - x_3^2}}{x_1 + l_{01}}; \lambda_4 = \frac{kx_3 x_2}{(x_1 + l_{01})}; \lambda_5 = \frac{b_2 x_6}{T_3(a_{21} - a_{22})}; \\ \lambda_6 &= \frac{T_3(kx_2 + a_{23}x_2 + a_{24} + z_f + b_1x_6) + x_2 - k(x_1 - x_1^*) + b_1x_5 + b_2x_6}{T_3(a_{21} - a_{22})}; \\ \lambda_7 &= \frac{a_{41}(x_4/p_m)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{(x_4^2 - p_a^2)}}{a_{42} - x_1}; \lambda_8 = \frac{kx_4 x_2}{a_{42} - x_1}. \end{aligned}$$

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Результаты моделирования системы с учетом линейно-нарастающего возмущения представлены на рис. 4–8. Значения возмущающего воздействия:

$$a_{m_1} = \begin{cases} -0,01t; t = 0, \\ 0,001t; t = 10, \\ -0,005t; t = 20. \end{cases}$$

Значения постоянных времени: $T_1 = T_2 = 0,1 \text{ s}$; $T_3 = 0,01 \text{ s}$. Были выбраны следующие значения параметров регулятора: $k = -1,6$; $b_1 = 0,05$; $b_2 = 0,65$; $\beta = 1$, при которых корни характеристического полинома (8) имеют значения: $p_1 = -1$; $p_2 = -0,5$; $p_3 = -0,25$, что согласно (9) является условием устойчивого асимптотического движения изображающей точки системы к заданной цели управления.

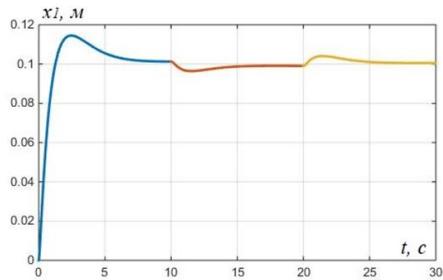


Рис. 4. Переходный процесс перемещения поршня при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

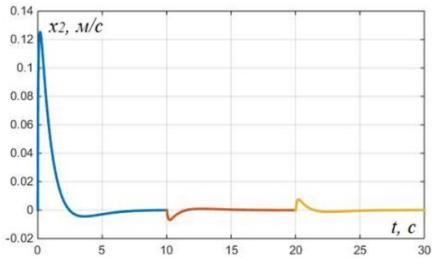


Рис. 5. Переходный процесс скорости поршня при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

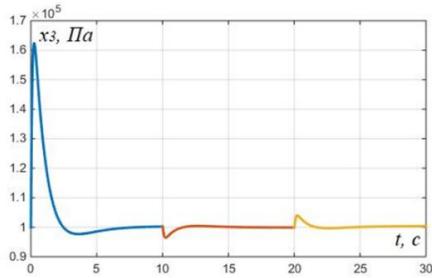


Рис. 6. Переходный процесс давления во впускной камере при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

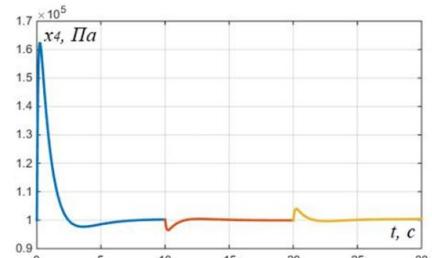


Рис. 7. Переходный процесс давления в выхлопной камере при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

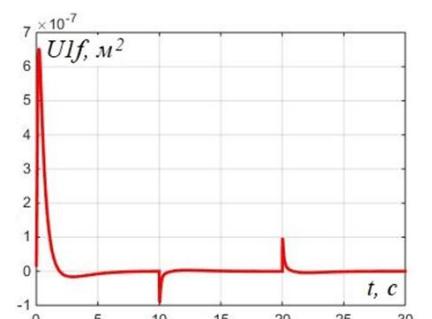


Рис. 8. График переходного процесса площади поперечного сечения ПР1 при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

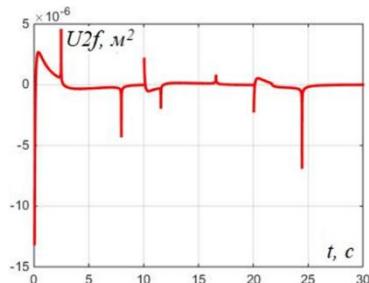


Рис. 9. График переходного процесса площади поперечного сечения ПР2 при кусочно-линейном возмущении с интегральной адаптацией

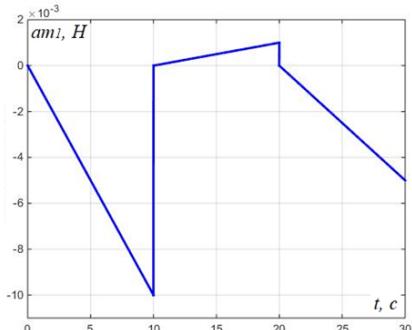


Рис. 10. График функции линейно-нарастающего возмущения

Полученные графики переходных процессов переменных состояния замкнутой электропневматической системы показывают, что синтезированный закон аддитивного нелинейного синергетического управления положением поршня пневмопривода, полученный методом интегральной адаптации синергетической теории управления подавляет кусочно-линейное возмущение.

Аддитивные свойства полученного синергетического закона управления обеспечиваются введением интегральных составляющих в закон управления, таким образом повышая астатизм системы, а, следовательно, точность работы замкнутой пневматической системы в условиях действия возмущений.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье поставлена технологическая задача управления положением поршня пневмопривода в условиях действия внешнего возмущения, возникающего в различных реальных условиях работы электропневматической системы, которая решается путем синтеза аддитивных нелинейных синергетических законов управления методами интегральной адаптации и аналитического конструирования агрегированных регуляторов, входящих в концепцию синергетической теории управления.

Возмущающее воздействие моделировалось в виде известной математической кусочно-линейной функций времени, которое было аддитивно введено в математическую модель замкнутой пневматической системы.

Результаты компьютерного моделирования подтвердили аддитивные свойства полученных нелинейных синергетических законов управления, к определенному классу возмущений, которые связаны с фундаментальными свойствами астатического управления совместно с притягивающими свойствами задаваемых инвариантных многообразий.

Важно отметить, что достоинством синтезированных адаптивных нелинейных синергетических законов управления является возможность их получения аналитическим путем, с помощью совместного решения введенных макропараметрических и функциональных уравнений, гарантирующих их устойчивость.

При этом управляющие воздействия обеспечивают асимптотическую устойчивость замкнутой системы при выполнении желаемых целей управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tóthová M., Pitel J., Hošovský A. Simulation of Hybrid Fuzzy Adaptive Control of Pneumatic Muscle Actuator // Intelligent Systems in Cybernetics and Automation Theory. –2015. – Vol. 2.– P. 239-246.
2. Qian P., Tao G., Meng D., Liu H. A modified direct adaptive robust motion trajectory tracking controller of a pneumatic system // Journal of Zhejiang University SCIENCE C. – 2014. – Vol. 15. – P. 878-891.
3. Tao G., Shang C., Meng D., Zhou C. Posture control of a 3-RPS pneumatic parallel platform with parameter initialization and an adaptive robust method // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. –2017. –Vol. 18. – P. 303-316.
4. Meng D., Tao G., Zhu X. Adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders // Journal of Central South University. – Vol. 20. –2013. – P. 3445-3460.
5. Meng D., Tao G., Liu H., Zhu X. Adaptive robust motion trajectory tracking control of pneumatic cylinders with LuGre model-based friction compensation // Chinese Journal of Mechanical Engineering. –2014. – Vol. 27.– P. 802-815.
6. Tran X., Nguyen V., Nguyen N.C., Pham D.T., Pha V.L. Sliding mode control for a pneumatic servo system with friction compensation // Advances in Engineering Research and Application. – 2019. – P. 648-656.
7. Колесников А.А. [и др.]. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы / под ред. А.А. Колесникова. – 2 изд.. – М.: ЛиброКом, 2013. – 304 с.
8. Kolesnikov A.A. Introduction of synergetic control // Proceedings of the American Control Conference. – 2014. – P. 3013-3016.
9. Колесников А.А. [и др.]. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, Ч.III, 2000. – 640 с.
10. Kuz'menko A. Integral adaptation of high order in problems of synthesis of nonlinear control systems // Informatics and control systems. – 2018. – No. 1 (55). – P. 142-153.
11. Kuz'menko A., Synitsin A., Zyiryanova. The use of integral adaptation principle to increase the reliability of synchronous generator nonlinear excitation system // Proceedings of 6th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT-2014). – 2014. – P. 415-420.
12. Kuz'menko A., Kolesnikov A., Kolesnichenko D. Novel robust control of hydrogenerator: The synergetic approach // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 48 (11). – P. 451-456.
13. Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S. Adaptive power saving control for traction asynchronous electrical drive: Synergetic approach // ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference. – P. 1446-1453.
14. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учеб. Для вузов. 2-е изд. стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с..
15. Obukhova E., Veselov G. Synergetic synthesis of adaptive control of an electro-pneumatic system // 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies. – 2020. – P. 13-18.
16. Obukhova E. Synergistic method of pneumatic drive control –Conference Paper in AIP Conference Proceedings 2188(1):030004, December 2019.

Задача построения динамической модели потребления кислорода человеком

Веремеюк Анастасия Игоревна

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
veremeuknasty@gmail.com

Шпаковская Ирина Игоревна

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
3533868@gmail.com

Душин Сергей Евгеньевич

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И.Ульянова (Ленина)
dushins@yandex.ru

Аннотация. Задача - построение и анализ математической модели потребления кислорода больным организмом на основе экспериментальных данных, полученных на велоэргометре в предоперационный период, с целью прогнозирования оперативного вмешательства. Предлагается модификация логистической модели, используемой при тестировании здоровых людей и спортсменов, состоящей в учете функционального состояния больного. Возможность повышения функционального состояния больного организма при нагрузочном тестировании интерпретируется работой системы управления.

Annotation. The task is to build and analyze a mathematical model of oxygen consumption by a sick organism based on experimental data obtained on a bicycle ergometer in the preoperative period in order to predict surgical intervention. A modification of the logistic model used in testing healthy people and athletes, which takes into account the functional state of the patient, is proposed. The possibility of increasing the functional state of a sick body during stress testing is interpreted by the operation of the control system.

Ключевые слова: потребление кислорода, нагрузочный тест, динамическая модель, управление процессом

Keywords: oxygen consumption, stress test, dynamic model, process control.

I. ВВЕДЕНИЕ

Физическая нагрузка относится к числу наиболее физиологических воздействий, позволяющих в полной мере оценить возможности компенсаторно-приспособительных механизмов организма. В случае явной или скрытой патологии нагрузочный тест указывает на степень функциональной несостоятельности кардиореспираторной системы человека. В медицинской практике широко используются динамические (изотонические) нагрузки, проводимые на велоэргометре. По результатам тестирования строятся различные математические модели: статистические и динамические. Последние представляют собой по сути дифференциальные уравнения.

Для получения динамической математической модели (ММ) потребления кислорода человеческим организмом проводился эксперимент, в ходе которого испытуемые подвергались физическим (тестовым) нагрузкам. В ходе эксперимента изучалось влияние нагрузки на функциональное состояние трех групп людей: здоровых, спортсменов и больных. В процессе тестирования проводились измерения респираторных параметров. Нагрузочные тесты выполнялись на велоэргометре, управляемом компьютером и обеспечивающим измерения частоты сердечных сокращений и артериального давления. Испытуемый крутит педали, вращение передается диску, который может затормаживаться механическим или электрическим способом. Измерение скорости вращения педалей или силы торможения диска позволяет определить усилия, затрачиваемые на выполнение работы. Одновременно измеряется вентиляция, газообмен, включая потребление кислорода. На рис. 1 изображена типичная экспериментальная зависимость потребления кислорода испытуемым от мощности работы.

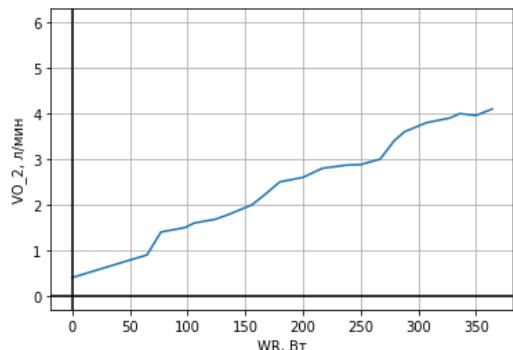


Рис. 1. Типичная зависимость потребления кислорода от мощности нагрузки

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ КИСЛОРОДА

Для составления ММ вводятся следующие обозначения переменных: WR – мощность нагрузки, Вт; $VO_2(WR)$ – текущее количество потребляемого кисло-

рода, зависящего от нагрузки, л/мин; VO_2^m – наибольшее возможное количество потребление кислорода организмом. Величина максимального потребления кислорода (МПК) зависит от особенностей организма.

Из основ физиологии [1] известно, что с возрастанием мощности нагрузки WR количество потребляемого кислорода VO_2 в аэробном режиме выработки энергии увеличивается, т.е. VO_2 возрастает в соответствии с WR . Однако, по достижению определенного значения, скорость потребления кислорода в зависимости от мощности нагрузки замедляется и постепенно эта величина становится постоянной, что связано с переходом организма на анаэробный режим выработывания энергии [2]. Этот факт можно отразить относительной величиной

$$1 - VO_2/VO_2^m,$$

которая с ростом нагрузки может снижаться до 0.

Объединяя аэробный и анаэробный режимы в одной модели, скорость потребления кислорода от мощности нагрузки будет характеризоваться логистическим дифференциальным уравнением

$$\frac{dVO_2}{dWR} = kVO_2(1 - VO_2/VO_2^m),$$

где k – коэффициент пропорциональности, [Вт]⁻¹. Такая ММ была использована в [3] при изучении здоровых и спортсменов. Коэффициент k , а также величина VO_2^m , находятся по данным измерений в ходе проведения нагрузочного теста. Очевидно, что для разных испытуемых значения этого коэффициента будут отличаться.

Анализ результатов, показанных на велоэргометре спортсменами, выявил следующие тенденции. Те испытуемые, которые имели высокие значения начального функционального состояния $VO_2(0)$ (например, 0,603, 0,585, 0,622), отличались высокими значениями VO_2^m (4,63, 4,80, 4,57), при этом коэффициенты k принимали сравнительно низкие значения (0,011, 0,011, 0,010 соответственно). И, наоборот, при низких начальных состояниях $VO_2(0)$ (3,96 и 0,479), их МПК VO_2^m также принимали низкие значения (3,63 и 3,41), а коэффициенты k имели высокие значения (0,016 и 0,014 соответственно). Эти тенденции следует далее учитывать при построении модифицированной модели для больных испытуемых. На рис. 2 приведены графики зависимостей потребления кислорода от нагрузки для испытуемых спортсменов.

Физическая нагрузка, при которой достигается максимальная скорость потребления кислорода, определяется координатами точек перегиба WR^π, VO_2^π представленных кривых:

$$WR^\pi = WR_0 - \frac{1}{k} \ln \left(\frac{VO_2(0)}{VO_2^m - VO_2(0)} \right), \quad VO_2^\pi = \frac{VO_2^m}{2},$$

где WR_0 – начальное значение нагрузки, $VO_2(0)$ – начальное значение потребления кислорода. Таким образом, для нагрузки WR^π , при которой скорость потребления кислорода максимальна, потребление кислорода равно половине от максимально возможного. Следовательно, для определения МПК VO_2^m достаточно ограничиться нагрузками, чуть превышающими половину $VO_2^m/2$, что упрощает тестирование. Этот вывод особенно важен для тестирования больных испытуемых.

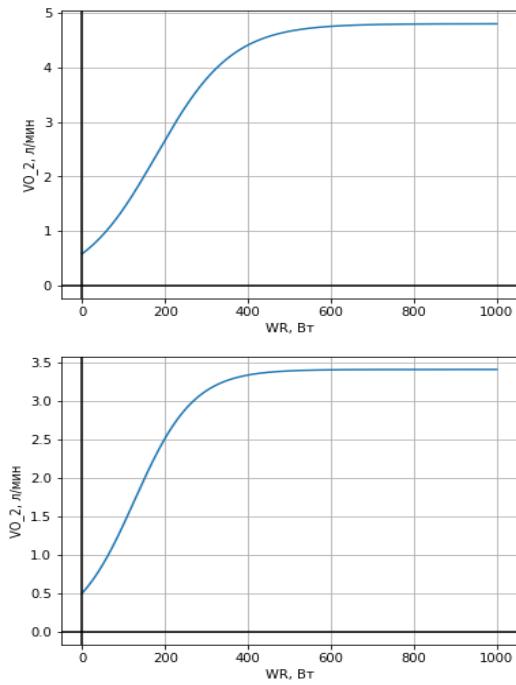


Рис. 2. Графики зависимости потребления кислорода от нагрузки для испытуемых-спортсменов

На рис. 3 приведен график зависимости потребления кислорода от нагрузки для здорового сорокалетнего испытуемого, который не являлся спортсменом. Экспериментальное исследование происходило при тех же условиях, что и для спортсменов.

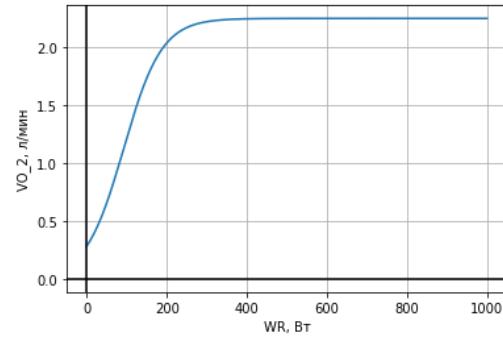


Рис. 3. График зависимости потребления кислорода от нагрузки для испытуемого не спортсмена

Анализ кривой показывает, что максимальная нагрузка у испытуемого не спортсмена ниже, чем у спортсменов. В ходе проведения эксперимента проявляется особенность динамики испытуемого: при любых начальных условиях $VO_2(0)$, когда $WR_0 = 0$, процессы сходятся к одному значению $VO_2 = VO_2^m$, отвечающему устойчивому состоянию равновесию (рис. 4).

Полученную особенность можно интерпретировать как способность динамической модели выходить на устойчивый аттрактор (соответствует максимальному потреблению кислорода) независимо от начального потребления кислорода без нагрузки. В качестве начальных условий, отличных от нормального (спокойного) состояния, можно рассматривать напряженность мышц, возбужденность, возможная усталость, прием возбуждающих или успокаивающих средств. Следовательно,

все эти показатели в момент начального состояния не влияют на величину конечного состояния динамической модели.

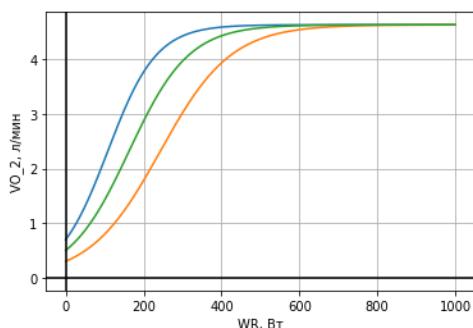


Рис. 4. Зависимость потребления кислорода испытуемого от нагрузки при разных начальных условиях

По итогам экспериментов можно сделать вывод о том, что изучаемая ММ может быть взята за основу для описания физиологических характеристик людей различного возраста и разного уровня физической подготовки, в том числе с патологией.

III. РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИСЛЕДОВАНИЯ ИСПЫТУЕМЫХ БОЛЬНЫХ ПРИ НАГРУЗОЧНОМ ТЕСТИРОВАНИИ НА ВЕЛОЭРГОМЕТРЕ

Нагрузочному тестированию подвергались испытуемые, имеющие различную степень онкологического заболевания, отличающиеся полом и возрастом. В основном это были пациенты среднего и пожилого возраста. Эксперимент ставился под наблюдением опытных врачей.

В качестве примера на рис. 5 для больных испытуемых приведены зависимости потребляемого кислорода от физической нагрузки. Отдельными точками представлены результаты измерений. Непрерывными линиями указаны аппроксимирующие кривые.

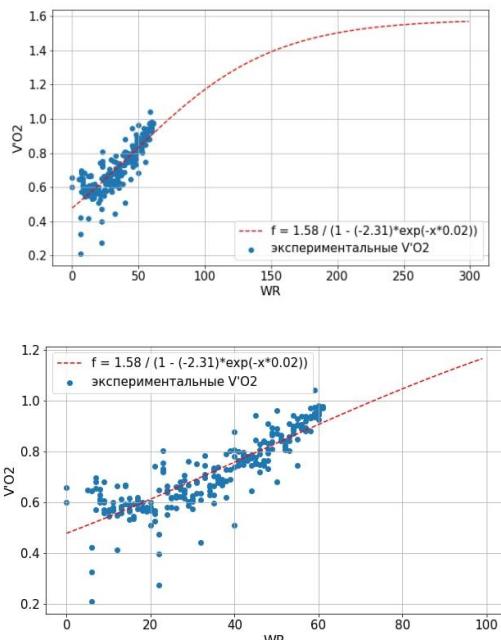


Рис. 5. Зависимости потребления кислорода от нагрузки для заболевших испытуемых

Для определения уровня МПК, необходимо, чтобы испытуемые при физической нагрузке достигали точки перегиба графика, соответствующей половине уровня МПК. Однако из графиков следует, что больные в ослабленном состоянии не способны достичь этого уровня. В то же время существует возможность повысить выносливость ослабленных пациентов с помощью лекарственных средств для получения нужных состояний организма в процессе тестирования. Такие эксперименты необходимы для выявления способности больных перенести хирургическое вмешательство.

IV. МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ КИСЛОРОДА БОЛЬНЫМИ ПРИ НАГРУЗОЧНОМ ТЕСТИРОВАНИИ

Опираясь на ранее полученную динамическую модель для здоровых людей и спортсменов, в структуру логистического уравнения вносятся изменения с целью разработки ММ для заболевших, в частности, онкологических больных. Для этого вводится параметр f , который будет характеризовать патологические отклонения больного от нормального состояния. При этом предполагается, что такой испытатель не сможет достигнуть уровня МПК, но ему под силу достичь половинного уровня МПК. Тогда модифицированная ММ будет иметь вид:

$$\frac{dV O_2}{dW R} = k V O_2 (1 - V O_2 / V O_2^m) + f,$$

где f характеризует определенную патологию больного.

Состояния равновесия модели находятся из выражений:

$$V O_2^P = \frac{V O_2^m}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4f}{k V O_2^m}} \right).$$

При $f = 0$ имеют место два состояния равновесия (две особые точки): устойчивое состояние $V O_2^m$ и неустойчивое нулевое состояние. Такая ситуация отвечает модели здорового человека, не спортсмена.

Если $f > 0$, то проявляется одно устойчивое положительное состояние, другое – отрицательное неустойчивое состояние – в живом организме недостижимо. Эта ситуация характерна для спортсменов.

Если $f < 0$, то оба состояния равновесия положительные, из которых только одно устойчивое. Устойчивость достигается при выполнении условия

$$f > -\frac{1}{4} k V O_2^m.$$

Как показывают качественные исследования такой динамической модели [4, 5], введение параметра f позволяет рассматривать две области поведения (рис. 6). Здесь N – переменная, относительно которой составлено уравнение. Область I соответствует нормальному изменению траекторий, когда они направлены от начального к устойчивому состоянию (можно считать, что это МПК). Данная область соответствуетциальному протеканию процессов в организме при физической нагрузке. Область II характеризуется траекториями, направленными от неустойчивого состояния. Попадание в

этую область указывает на неблагоприятное состояние организма, которое ведет к осложнениям в послеоперационный период и даже, в конечном итоге, может приводить к летальному исходу.

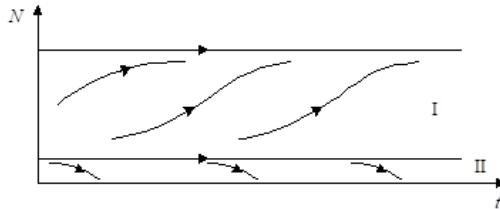


Рис. 6. Поведение динамической модели при введении параметра f

V. НАГРУЗОЧНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ КАК ВОЗМУЩАЮЩИЙ ФАКТОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В общем случае лечение многих заболеваний можно рассматривать как процесс управления состоянием организма во времени, где объектом управления (ОУ) выступает сам больной (объект лечения), а врач, назначающий лекарства, представляет собой своеобразный регулятор. Такой системе присущи, как и любой системе управления (СУ), определенные динамические свойства: управляемость (способность ОУ под действием управления переходить за конечное время из одного состояния в другое, быть может патологическое), устойчивость (при лечении, рассматриваемое как внешнее вмешательство, система способна сохранять либо исходное (нормальное) состояние, либо патологическое в течение продолжительного времени, но летальный исход исключается), инвариантность (слабое реагирование на внешние возмущения (раздражители), что может быть, например, обусловлено работой иммунной системы), грубость /робастность/ (сохранять функциональность организма при определенных внутренних изменениях).

В частности, нагрузочное тестирование можно рассматривать как действие внешнего фактора (возмущения) на систему, которая способна управлять уровнем потребления кислорода больных, проводимое с целью выработки рекомендаций по проведению оперативного вмешательства. Управление достигается за счет организации обратной связи через врача. Схема такой СУ приведена на рис. 7.



Рис. 7. Схема экспериментальных исследований как системы управления

Как следует из схемы, физическая нагрузка WR при тестировании является возмущением, приложенным к больному. Если последний подвергается оперативному вмешательству, то операцию также можно представить, как действие возмущения.

При прохождении теста снимаются (измеряются) данные о различных параметрах, характеризующих испытуемого. К ним можно отнести частоту дыхания, потребление кислорода, выделение углекислого газа, артериальное давление, частоту сердечных сокращений и другие. Таким образом, ОУ интерпретируется как многочленный. В данной работе выделяется лишь один параметр — потребление кислорода.

Больные, представляемые как ОУ (см. рис. 7), могут отличаться полом, возрастом, разной степенью состояния организма в зависимости от основного и сопутствующих заболеваний. Разрабатываемая модель должна отражать перечисленные факторы.

Управление осуществляется в виде назначения пациентам медикаментов лечащим врачом, предполагая их обязательный прием. В данном случае прием лекарственных препаратов может производиться с целью облегчения перенесения испытуемым нагрузок и возможного преодоления половинного уровня МПК в аэробном режиме.

Работа системы происходит в непрерывно-дискретном режиме: в течение определенного временного интервала осуществляется непрерывное нагрузочное тестирование, затем, в зависимости от показаний измерительно-регистрирующей аппаратуры, происходит анализ и назначается лекарство, которое принимает больной для прохождения повторного теста с более высоким потенциалом переносимости нагрузок. Например, это может отразиться в виде изменения начальных условий ММ в сторону возрастания.

В том случае, если существует возможность непосредственного измерения потребления кислорода и оперативного введения лекарственных средств, повышающих функциональное состояние, область II на рис. 6 может быть исключена. На рис. 8 приведена единственная возможная область поведения модели, указывающая на благоприятное состояние организма для проведения операции.

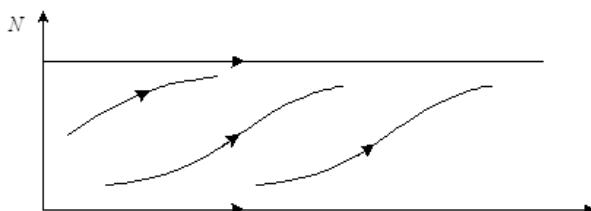


Рис. 8. Поведение динамической модели при оперативном введении лекарственных средств

VI. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для удобства внесения структурных изменений в модель с целью повышения ее адекватности построена компьютерная модель с использованием графического программного средства MATLAB/Simulink. Моделирование ведется с применением численных методов интегрирования, имеющихся в библиотеке Simulink. На вход модели подается воздействие f , которое может быть интерпретировано как возмущение, характеризующее функциональный потенциал человека.

При $f = 0$ поведение системы следует рассматривать как реакцию здоровых людей без патологических отклонений.

При $f > 0$ испытуемые обладают повышенным физическим состоянием и соответствуют модели спортсмена.

При $f < 0$ испытуемых будем относить к заболевшим, имеющих ухудшенное здоровье (низкий функциональный потенциал).

На рис. 9 представлены графики зависимости потребления кислорода от нагрузки при разных начальных состояниях испытуемых, но одинаковых f . Представленное семейство кривых отражает выявленную тенденцию: при низком начальном состоянии уровень МПК также невысок.

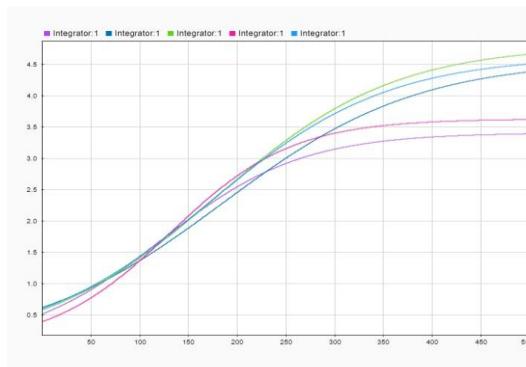


Рис. 9. Графики зависимостей потребления кислорода для спортсменов при одинаковых f

Можно выдвинуть гипотезу о том, что в зависимости от f будет меняться уровень МПК VO_2^m .

На рис. 10 приведено семейство графиков для одного испытуемого при различных f .

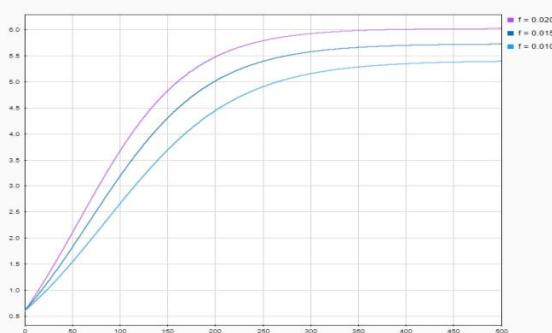


Рис. 10. Графики зависимостей потребления кислорода для одного испытуемого при разных значениях f

По результатам численного моделирования и представленным графикам можно сделать вывод о том, что уровень МПК действительно зависит от параметра f . Чем больше f , тем больше потребление кислорода, что дает основание сделать заключение о верности выдвинутой гипотезы. Таким образом, если существует способ вычисления параметра f , можно установить для конкретного испытуемого возможность достижения мощности нагрузки, соответствующей половинному уровню МПК.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты вычислительного эксперимента показали, что динамическая логистическая модель может быть принята в качестве модели потребления кислорода для здоровых людей и спортсменов при нагрузочном тестировании на велоэргометре. Делается вывод, что для определения максимального потребления кислорода больного вполне достаточно обеспечить достижение мощности нагрузки, соответствующей половинному уровню максимального потребления.

2. Динамическая модель больных отличается учетом снижения физического состояния при нагрузочном тестировании за счет введения дополнительного параметра.

3. Схему проведения экспериментальных исследований больных на велоэргометре с целью проведения оперативного вмешательства следует рассматривать как систему управления процессом потребления кислорода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы физиологии / под ред. П. Стёрки. — М.: Мир, 1984. — 556 с.
2. Попов Д.В., Виноградов О.Л., Григорьев А.И. Аэробная работоспособность человека. — М.: Наука, 2012. — 111 с.
3. Дёмин А.В., Несторов А.Н., Суворов А.В. Математическая модель потребления кислорода здоровым человеком при физической работе // Технология живых систем. — 2014. — Т. 11, № 3. — С. 3-9.
4. Арнольд В.И. Жесткие и мягкие математические модели. — М.: МЦНМО, 2000.
5. Душин С.Е., Красов А.В., Кузьмин Н.Н. Моделирование систем управления: учеб. пособие для вузов / под ред. С.Е. Душкина. — М.: Студент, 2012. — 348 с.

Некоторые математические вопросы для задач оптимального управления

Куповых Геннадий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kupovukh@sfedu.ru

Клово Александр Георгиевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
klovo_ag@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы существования и единственности оптимального управления гиперболическими уравнениями, взаимосвязь вопросов управляемости системой и единственности оптимального управления. Особое внимание удалено задачам, связанным с минимизацией квадратичного функционала, а также задачи попадания в фиксированную точку или ее окрестность в некотором функциональном пространстве за минимальное время. Исследован вопрос, в каких случаях управление, оптимальное на заданном временном промежутке, будет оптимальным и на временном промежутке, содержащемся в заданном. Одновременно описана специфика задач оптимального управления системами с распределенными параметрами, связанная с размерностью соответствующего пространства. Введено новое понятие - всюду оптимальное управление системой с распределенными параметрами.

Annotation. The questions of the existence and uniqueness of optimal control of hyperbolic equations, the relationship between the issues of controllability of the system and the uniqueness of optimal control are considered. Special attention is paid to the problems associated with minimizing the quadratic functional, as well as the problem of getting to a fixed point or its neighborhood in a certain functional space in minimal time. The question is investigated in which cases the control

пространственной размерности рассмотрены в работах [9–10]. Исследование возможности синтеза оптимального управления колебаниями струны изучены в работах [11–13].

В настоящей работе рассмотрены некоторые вопросы управления неоднородной струной и системами с распределенными параметрами, которые описываются многомерными гиперболическими уравнениями.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть Ω – ограниченное открытое множество в R^n с границей Γ (непрерывно дифференцируемое многообразие размерности $n-1$), $\Sigma = \Gamma \times (0, T) \subset R^{n+1}$ – боковая поверхность цилиндра $Q = \Omega \times (0, T) \subset R^{n+1}$. Для функции. $u(t, \vec{x})$, $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ рассматривается задача

that is optimal for a given time interval will also be optimal for a time interval contained in a given one. At the same time, the specifics of optimal control problems for systems with distributed parameters related to the dimension of the corresponding space are described. A new concept is introduced - everywhere optimal control of a system with distributed parameters.

Ключевые слова: теория управления, гиперболические уравнения, колебания, синтез, оптимальное управление, управляющая функция, краевая задача.

Keywords: control theory, hyperbolic equations, oscillations, synthesis, optimal control, control function, boundary value problem.

I. ВВЕДЕНИЕ

Задачам оптимального управления системами с распределенными параметрами посвящено много исследований. Условия, при которых соответствующие задачи имеют классические и обобщенные решения, указаны в работах [1–3]. В работах [4, 5] поставлена задача приведения струны в заданное состояние, исследованы вопросы управляемости такой системой и единственности оптимального управления. Серия задач управления колебаниями струны рассмотрена в работах [6–8]. Некоторые задачи для гиперболических и ультрагиперболических уравнений большей

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = Lu, \quad (1)$$

$$u(0, \vec{x}) = \varphi(\vec{x}), \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = \psi(\vec{x}), \quad (3)$$

$$u(t, \vec{x})|_{\Sigma} = p(t, \vec{x}), \quad (4)$$

где

$$L = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_{ij}(t; x) \frac{\partial}{\partial x_i} \right) + \sum_{i=1}^n a_i(t; x) \frac{\partial}{\partial x_i} + a_0(t; x)$$

строго эллиптический оператор, т.е. для него выполнено условие

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(t;x) \xi_i \xi_j \geq \mu \sum_{i=1}^n \xi_i^2, \quad \mu > 0$$

и, кроме того,

$$a_{ij}(t;x) \in C^{1,0}_{t,x}(\bar{Q}), \quad a_{ij}(t;x) \in C^{1,0}_{t,x}(\bar{Q}), \quad a_0(t;x) \in C^0.$$

Умножая (1) на $\frac{\partial u}{\partial t}$ и интегрируя полученное тождество по слоям цилиндра Q , получим справедливость следующего утверждения

Лемма 1. Пусть в задаче (1)-(4) имеет место: $\varphi(\vec{x}) \in C^2(\Omega)$, $\psi(\vec{x}) \in C^1(\Omega)$, $p(t, \vec{x}) \in C^2(\Sigma)$.

Тогда для классического решения этой задачи справедлива оценка

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial u}{\partial x_i} \right)^2 \right) dx_1 dx_2 \dots dx_n \leq \\ & \leq M \left(\|\varphi\|_{W_2^1(\Omega)}^2 + \|\psi\|_{L_2(\Omega)}^2 + \|p\|_{W_2^1(\Sigma)}^2 \right) \end{aligned}, \quad (5)$$

где константа M зависит от L и Q , а $0 < \tau \leq t$.

Нашей целью будет поиск оптимального в соответствующем смысле управления $p(t, \vec{x})$.

III. СУЩЕСТВОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ С ФИКСИРОВАННЫМ ПРОМЕЖУТКОМ ВРЕМЕНИ

Мы будем считать, что функция $p(t, \vec{x})$, понимаемая нами как управление задачи (1)-(4), принадлежит некоторому множеству допустимых управлений P из функционального пространства $W_2^1(\Sigma)$. Для того, чтобы гарантировать существование оптимального в определенном смысле управления, нам необходимо ввести понятие обобщенного решения задачи (1)-(4).

Определение 1. Обобщенным решением задачи (1)-(4) называется функция $u(t, \vec{x}) \in W_2^1(\Omega)$, удовлетворяющая начальному условию (2), граничному условию (4) и удовлетворяющая следующему интегральному тождеству

$$\begin{aligned} & \iint_Q \left(\frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(t; x) \frac{\partial u}{\partial x_i} \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n a_i(t; x) \frac{\partial u}{\partial x_i} \Phi + a_0(t; x) u \Phi \right) d\vec{x} dt = \\ & = \int_{\Omega} \psi(x) \Phi(0; x) d\vec{x} \end{aligned} \quad (6)$$

для каждой функции $\Phi(t, \vec{x})$ с носителем строго внутри области Σ .

Замечание 1. Мы будем предполагать, что условия (2) и (4) выполняются в обобщенном смысле, т.е. что решение $u(t, \vec{x}) \in W_2^1(\Omega)$ является пределом функций, для которых выполнены эти условия ([1]).

Путем предельного перехода доказывается теорема.

Теорема 1. Пусть $\varphi(\vec{x}) \in W_2^1(\Omega)$, $\psi(\vec{x}) \in L_2(\Omega)$, $p(t, \vec{x}) \in W_2^1(\Sigma)$ и выполнено обобщенное условие согласования $\varphi(\vec{x})|_{x \in \Gamma} = p(0, \vec{x})$. Тогда существует обобщенное решение задачи (1)-(4).

Считая время T фиксированным, рассмотрим задачу минимизации при $t=T$ квадратичного функционала $J(u)$, например,

$$J(u) = \int_{\Omega} \left(u^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \right) dx_1 dx_2 \dots dx_n. \quad (7)$$

Справедлива следующая теорема.

Теорема 2. Пусть $\varphi(\vec{x}) \in W_2^1(\Omega)$, $\psi(\vec{x}) \in L_2(\Omega)$ и $p(t, \vec{x}) \in P$ – ограниченному, выпуклому, замкнутому множеству из $W_2^1(\Sigma)$ допустимых управлений. Тогда для задачи (1)-(4) существует оптимальное управление $p^*(t, \vec{x})$, реализующее минимум функционала (7).

Доказательство теоремы 2 основывается на том факте, что в силу ограниченности снизу множества значений функционала (7) существует минимизирующая этот функционал последовательность управлений. При этом можно доказать, что из нее можно выбрать сходящуюся последовательность, пределом которой и является искомое оптимальное управление.

В самом деле, предположим, что оптимальное управление не существует. В силу леммы 1 существует минимизирующая последовательность допустимых управлений $\{p_n(t, \vec{x})\}$, т.е. таких, что для соответствующих решений $\{u_n(t, \vec{x})\}$ выполнено условие

$$J(u_n) \rightarrow \inf_{n \rightarrow +\infty} J(u).$$

Не теряя общности, можно считать, последовательность $\{J(u_n)\}$ монотонно не возрастает. Каждому управлению $p_n(t, \vec{x})$ из этой последовательности поставим в соответствие допустимое управление $\bar{p}_n(t, \vec{x})$ следующим образом.

Рассмотрим множество допустимых управлений

$$P_n = \{p(t, \vec{x}) : p \in P, J(u) \leq J(u_n)\}.$$

Пусть

$$\inf_{p \in P_n} \|p\|_{W_2^1(\Sigma)} = \alpha_n,$$

Тогда существует управление $\bar{p}_n(t, \vec{x})$, реализующее этот инфинум. Действительно, пусть $\{p_{n_i}\}$ – последовательность управлений из P_n такая что

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \|p_{n_i}\|_{W_2^1(\Sigma)} = \alpha_n.$$

В силу выпуклости множества допустимых управлений этому множеству принадлежит управление $\bar{p}(t, \vec{x}) = 0,5(p_{n_i} + p_{n_j})$.

Для произвольного $\varepsilon > 0$ существует $N(\varepsilon)$ такое что при $i > N(\varepsilon)$ выполнено неравенство

$$\|p_{n_i}\|_{W_2^1(\Sigma)}^2 < \alpha_n^2 + \varepsilon.$$

Пусть $i > N(\varepsilon)$ и $j > N(\varepsilon)$, тогда

$$\begin{aligned} \alpha_n^2 &\leq \|\hat{p}(t, \vec{x})\|_{W_2^1(\Sigma)}^2 \leq \\ &\leq 0,5\left(\|p_{n_i}\|_{W_2^1(\Sigma)}^2 + \|p_{n_j}\|_{W_2^1(\Sigma)}^2\right) < \alpha_n^2 + \varepsilon \end{aligned}$$

и можно получить соотношение

$$0,25\|p_{n_i} - p_{n_j}\|_{W_2^1(\Sigma)}^2 < \varepsilon,$$

что и доказывает существование управления $\bar{p}_n(t, \vec{x})$.

Несложно проверить, что полученная последовательность $\{\bar{p}_n(t, \vec{x})\}$ имеет предельный элемент в пространстве $W_2^1(\Sigma)$. В силу замкнутости множества допустимых управлений и леммы 1 отсюда следует, что предельное управление $p^*(t, \vec{x})$ является искомым оптимальным управлением. Теорема 2 доказана.

IV. АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для получения ряда результатов полезно использовать эквивалентное определение оптимального управления.

Лемма 2. Рассматривается задача минимизации квадратичного функционала $J(u)$ за заданный фиксированный промежуток времени T . Мы будем считать, что $J(u)$ определяется положительно определенной билинейной формой $f(u, v)$. Тогда допустимое управление $p^*(t, \vec{x})$ будет оптимальным тогда и только тогда, когда для любого допустимого управления $p(t, \vec{x})$ и соответствующих обобщенных решений $u^*(t, \vec{x})$ и $u(t, \vec{x})$ задачи (1)-(4) выполнено соотношение

$$f(u^*, u^* - u) \leq 0. \quad (8)$$

Для доказательства этой леммы достаточно рассмотреть допустимое управление

$$\bar{p}(t, \vec{x}) = p^*(t, \vec{x}) + \lambda(p(t, \vec{x}) - p^*(t, \vec{x}))$$

и исследовать квадратный трехчлен относительно λ , полученный после подстановки функции $\bar{p}(t, \vec{x})$ в билинейную форму $f(u^*, u^* - u)$.

В самом деле, в силу выпуклости множества допустимых управлений при $0 \leq \lambda \leq 1$ управление $\bar{p}(t, \vec{x})$ является допустимым. Ему соответствует решение задачи (1)-(4), равное

$$\bar{u}(t, \vec{x}) = u^*(t, \vec{x}) + \lambda(u(t, \vec{x}) - u^*(t, \vec{x})).$$

Для этого решения функционал (7) примет вид

$$\begin{aligned} J(\bar{u}) &= \int_{\Omega} \left((u^*(T, \vec{x}) + \lambda(u(T, \vec{x}) - u^*(T, \vec{x})))^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right)^2 \Big|_{t=T} \right) dx_1 dx_2 \dots dx_n = \\ &= J(u^*) - 2\lambda f(u^*, u^* - u) + \lambda^2 J(u^* - u). \end{aligned}$$

Заметим, что квадратный трехчлен

$$J(u^*) - 2\lambda f(u^*, u^* - u) + \lambda^2 J(u^* - u)$$

при $u \neq u^*$ имеет положительный коэффициент $J(u^* - u)$ при λ^2 . Поэтому данная квадратичная функция принимает наименьшее значение в вершине параболы

$$\lambda_0 = \frac{f(u^*, u^* - u)}{J(u^* - u)}.$$

Если условие (8) не выполнено, то λ_0 является положительным числом и при достаточно малых $\lambda > 0$ выполнено неравенство $J(\bar{u}) > J(u^*)$, что противоречит оптимальности управления $p^*(t, \vec{x})$.

Итак, условие (8) является необходимым условием оптимальности $p^*(t, \vec{x})$. Также оно является и достаточным условием. Для проверки этого факта можно взять $\lambda = 1$. Тогда

$$p^*(t, \vec{x}) + 1 \cdot (p(t, \vec{x}) - p^*(t, \vec{x})) = p(t, \vec{x})$$

откуда

$$J(u) = J(u^*) - 2f(u^*, u^* - u) + J(u^* - u) > J(u^*).$$

Лемма 2 доказана.

V. КАЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Применим эквивалентное определение оптимального управления из леммы 2 в области

$$D = \{(t, x) : x \in (0, 1), t \in (0, T)\}$$

для одномерной задачи оптимального управления

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a(t, x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + b(t, x) \frac{\partial u}{\partial x} + c(t, x)u, \quad (9)$$

$$u(0, x) = \varphi(x), \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} = \psi(x), \quad (11)$$

$$u(t,0) = p(t), \quad (12)$$

$$u(t,1) = q(t). \quad (13)$$

Мы будем предполагать, что для задачи (9)-(13) выполнены указанные в общем виде условия принадлежности функциональным пространствам и условия соглашения.

Задачу (9)-(13) при заданном T будем называть управляемой, если для любых допустимых функций $\varphi(x) \in W_2^1(0;1)$, $\psi(x) \in L_2(0;1)$ существует управление $(p^*(t), q^*(t))$ из соответствующего класса функций такое, что для полученного обобщенного решения выполнены условия

$$u^*(T,x) \equiv 0, \quad \left. \frac{\partial u^*}{\partial t} \right|_{t=T} \equiv 0.$$

Из точек $(t,x) = (0,0)$ и $(t,x) = (0,1)$ проведем две характеристики внутрь области D и пусть они пересекают прямые $x=0$ и $x=1$ в точках $t=T_1$ и $t=T_2$. Тогда при $T < \min\{T_1, T_2\}$ оптимальное управление является единственным, а задача неуправляемой. При $T > \max\{T_1, T_2\}$ оптимальное управление не является единственным, а задача будет управляемой. При $T = T_1 = T_2$ оптимальное управление является единственным, а задача управляемой. Для однородной струны будет выполнено условие $T_1 = T_2$.

VI. Всюду оптимальное управление

В задачах на отыскание оптимального управления с фиксированным промежутком времени не предполагалось ([4–8]), что найденное оптимальное управление на промежутке времени $[0,T]$ также оптимально на промежутке $[0, T_1]$, где $T_1 < T$. Интересно найти условия, при которых управление, оптимальное при $\tau = T$, будет оптимальным и при каждом меньшем положительном $\tau = T$. Управление, обладающее этим свойством, назовем всюду оптимальным управлением.

Будем снова рассматривать задачу (1)–(4). Для удобства управляемой функцией мы будем называть функцию

$$g(t,\vec{x}) = \frac{\partial p(t,\vec{x})}{\partial t}.$$

Будет справедлива следующая теорема о необходимых и достаточных условиях всюду оптимальности.

Теорема 3. Пусть известно, что

a) Выполнены условия теоремы существования оптимального управления (теорема 2).

б) Множество допустимых управлений обладает тем свойством, что управление, допустимое на интервалах (t_1, t_2) и (t_2, t_3) , будет допустимым и на интервале (t_1, t_3) .

в) Пусть $T \geq t_2 > t_1 \geq 0$, $g_1^*(t,\vec{x})$ – управляющая функция на отрезке $[0, t_1]$, $g_{12}^*(t,\vec{x})$ – управляющая функция на отрезке $[t_1, t_2]$, $u^*(t,\vec{x})$ – обобщенное решение задачи (1)–(4), отвечающее этим управлением. Рассмотрим произвольную управляющую функцию $g(t,\vec{x})$, соответствующую произвольному допустимому управлению на $[0, t_1]$ и совпадающую с управляющей функцией $g_1^*(t,\vec{x})$ на $[t_1, t_2]$. Тогда при $t = t_2$ выполнено неравенство

$$J(u^*) \leq J(u),$$

где $u(t,\vec{x})$ – обобщенное решение задачи (1)–(4), соответствующее управляющей функции $g(t,\vec{x})$.

Тогда существует единственное всюду оптимальное управление задачи (1)–(4).

Для доказательства теоремы 3 построим искомое управление как предел управляющих функций $\{g_i^*(t,\vec{x})\}$, соответствующих монотонно возрастающей последовательности натуральных чисел $\{N_i\}$ следующим образом.

Пусть N_i задано. Разобьем отрезок $[0, T]$ на N_i равных отрезков Δ_k , $k = 1, 2, \dots, N_i$ и каждому отрезку Δ_k поставим в соответствие управление $p_{ik}^*(t,\vec{x})$, порождаемое управляющей функции $g_{ik}^*(t,\vec{x})$, оптимальное на этом отрезке для начальных данных, равным конечным на временном отрезке Δ_{k-1} . Начальные данные для Δ_1 равны начальным условиям задачи (1)–(4). Если оптимальное управление $p_{ik}^*(t,\vec{x})$ на Δ_k не единственное, то мы берем оптимальное управление с минимальной нормой $\|p_{ik}^*(t,\vec{x})\|_{W_2^1(\Sigma)}$. Такое управление строится при доказательстве теоремы 2. Итак, мы получили управляющую функцию $g_i^*(t,\vec{x})$. Докажем, что она является оптимальной для точек деления отрезка $[0, T]$. Для первой точки деления оптимальность очевидна. Пусть индуктивное предположение выполнено для m -ой точки. Обозначим ее через t_1 , а следующую точку деления через t_2 . Докажем, что синтезированное управление оптимально для $\tau = t_2$. По лемме 2 достаточно показать, что при $\tau = t_2$ выполнено соотношение

$$f(u^*, u^* - u) \leq 0,$$

где $u^*(t,\vec{x})$ соответствует синтезированному управлению, а $u(t,\vec{x})$ – произвольному допустимому управлению $p(t,\vec{x})$. Введем следующие обозначения:

1) $u_{t_1}^*(t, \vec{x})$ соответствует управлению

$$g_{t_1}^*(t, \vec{x}) = \begin{cases} g_i^*(t, \vec{x}) & \text{при } t \in (0, t_1), \\ 0 & \text{при } t \in (t_1, t_2). \end{cases}$$

2) $c(t, \vec{x}) = u^*(t, \vec{x}) - u_{t_1}^*(t, \vec{x})$.

3) $u_{t_1}(t, \vec{x})$ соответствует управлению

$$g_{t_1}(t, \vec{x}) = \begin{cases} g(t, \vec{x}) & \text{при } t \in (0, t_1), \\ 0 & \text{при } t \in (t_1, t_2). \end{cases}$$

4) $d(t, \vec{x}) = u(t, \vec{x}) - u_{t_1}(t, \vec{x})$.

5) $u_{t_1}(t, \vec{x})$ соответствует управлению

$$\bar{g}(t, \vec{x}) = \begin{cases} g(t, \vec{x}) & \text{при } t \in (0, t_1), \\ g^*(t, \vec{x}) & \text{при } t \in (t_1, t_2). \end{cases}$$

Все построенные управление являются допустимыми в силу пункта б) теоремы 3.

Итак, при $t = t_2$ выполнены соотношения

$$\begin{aligned} f(u^*, u^* - u) &= f(u_{t_1}^* + c, u_{t_1}^* + c - u_{t_1}^* - d) = \\ &= f(u_{t_1}^* + c, u_{t_1}^* + c - u_{t_1}^* - d) + \\ &\quad + f(u_{t_1}^* + c, u_{t_1}^* - u_{t_1}). \end{aligned}$$

Первое слагаемое в этом соотношении не положительно в силу леммы 1 и оптимальности управления на (t_1, t_2) . Рассмотрим второе слагаемое

$$f(u_{t_1}^* + c, u_{t_1}^* - u_{t_1}) = f(u^*, u^* - \bar{u}).$$

В силу выпуклости множества допустимых управлений управление, соответствующее управляющей функции

$$g_1(t, \vec{x}) = g^*(t, \vec{x}) + \lambda(\bar{g}(t, \vec{x}) - g^*(t, \vec{x}))$$

является допустимым при $0 \leq \lambda \leq 1$.

Пусть управляющей функции $g_1(t, \vec{x})$ соответствует обобщенное решение задачи (1)-(4) $u_1(t, \vec{x})$. Заметим, что

$$J(u_1) = J(u^*) - 2\lambda f(u^*, u^* - \bar{u}) + \lambda^2 J(u^* - \bar{u})$$

и в силу пункта в) теоремы 3 выполняется неравенство

$$J(u_1) \geq J(u^*),$$

откуда

$$f(u^*, u^* - \bar{u}) \leq 0.$$

В силу полученных соотношений и в силу леммы 1 синтезированное таким образом управление оптимально при $\tau = t_2$.

Итак, управление $p_i^*(t, \vec{x})$ оптимально в каждой точке деления отрезка $[0, T]$. Не теряя общности можно

считать, что точки деления при данном разбиении содержатся среди точек деления при следующем разбиении. Следовательно, полусумма двух произвольных управлений из последовательности $\{g_i^*(t, \vec{x})\}$ будет оптимальным управлением для общих точек деления и, в силу выбора $g_i^*(t, \vec{x})$, по норме будет не меньше минимальной из норм этих двух управлений. С другой стороны, норма полусуммы всегда не больше максимальной из этих норм. Отсюда вытекает, что последовательность $\{g_i^*(t, \vec{x})\}$ сходится в пространстве $W_2^1(\Sigma)$ к некоторому управлению $g^*(t, \vec{x})$. Очевидно, что это и есть искомое всюду оптимальное управление. Теорема доказана.

В качестве приложения этой теоремы можно доказать, что для задачи (9)-(13) с $a(t, x) = 1$, $b(t, x) = c(t, x) = 0$, $p(t) = 0$ и управлением на правой границе $q(t)$ всюду оптимальное управление существует, если использовать минимизирующий функционал

$$\int_0^T \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{t=T} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=T} \right)^2 \right) dx. \quad (14)$$

Уточняя для этого случая теорему 1, несложно получить, что задача управляема за время $T = 2$. Пусть за это время управление $q^*(t)$ переводит начальные условия (10), (11) в нулевые, причем такое управление единственное. Выполнение всех условий теоремы 3 очевидно, кроме условия в). Для проверки этого условия заметим, что минимизация функционала (14) равносильна минимизации функционала

$$\int_0^T \left(\left(\frac{\partial u}{\partial l} \Big|_{t=T} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial \bar{l}} \Big|_{t=T} \right)^2 \right) dx, \quad (15)$$

где l и \bar{l} – характеристики для рассматриваемого волнового уравнения. Каждое из слагаемых (15), как легко проверить, сохраняется вдоль другой характеристики. Отсюда следует, что уменьшение (14) на временном промежутке $[t_1, t_2]$ не зависит от управления на $[0, t_1]$. Следовательно, условие в) выполнено и теорема 3 применима.

Обобщенное решение рассматриваемой задачи можно представить в виде суммы двух функций

$$u(t, x) = u_1(t, x) + u_2(t, x),$$

где $u_1(t, x)$ является решением задачи с $q(0) = \varphi(1)$. Каждое из этих слагаемых может быть найдено в явном виде.

Пусть

$$\left. \frac{\partial u_1(t, x)}{\partial x} \right|_{x=1} = \alpha(t),$$

тогда, в силу всюду оптимальности, необходимо в каждой точке временного промежутка длины 2 минимизировать величину

$$q'(t)(q'(t) + \alpha(t)).$$

Следовательно,

$$\frac{dq^*(t)}{dt} = -\frac{\alpha(t)}{2}$$

и при этом легко проверить, что

$$\alpha(t) = \varphi'(|t-1|) + \text{sign}(t-1)\psi(|t-1|).$$

Отсюда

$$q^*(t) = \varphi(1) - \frac{1}{2} \int_0^t (\varphi'(|\xi-1|) + \text{sign}(\xi-1)\psi(|\xi-1|)) d\xi \quad (16)$$

и всюду оптимальное управление найдено в явном виде (16).

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследованы некоторые одномерные и многомерные задачи оптимального управления объектами, описываемыми гиперболическими уравнениями. Выявленная взаимозависимость единственности оптимального управления и управляемости поставленной задачи полностью решена в одномерном случае. Получены условия всюду-оптимальности управления одной системой с распределенными параметрами.

Представляется интересным дальнейшее изучение этого вопроса в пространствах нескольких измерений, а также развитие теории синтеза оптимального управления сложными системами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ладыженская О.А.. Краевые задачи математической физики. – М.: Наука, 1973. - 407 с.
2. Соболев С.Л. Некоторые применения функционального анализа в математической физике. – М.: Наука, 1988. – 336 с. – ISBN:5-02-013756-1.
3. Ильин В.А. О разрешимости смешанных задач для гиперболического и параболического уравнений // УМН. – 1960. – 15:2 (92). – С. 97-154.
4. Ламмес Р., Лионс Ж.-Л. Метод квазиобращения и его приложения. – М.: Изд-во «Мир». 1970. – 304 с.
5. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. – М.: Изд-во «Мир». 1972. – 414 с.
6. Ильин В.А., Моисеев Е.И. Оптимизация граничных управлений колебаниями струны // УМН. – 2005. – 60:6 (366). – С. 89-114. – DOI: 10.4213/rm1678.
7. Моисеев Е.И., Холомеева А.А., Фролов А.А. Граничное управление смещением процессом колебаний при граничном условии типа торкмажения за время, меньшее критического // Итоги науки и техн. Сер. Соврем. мат. и ее прил. Темат. обз. – 2019. – 160. – С. 74-84. – ISSN: 0233-6723.
8. Моисеев Е.И., Холомеева А.А. Оптимальное граничное управление смещением на одном конце струны при заданной упругой силе на другом конце // Тр. ИММ УрО РАН. – 2011. – 17:2. – С. 151-158. – ISSN: 0134-4889.
9. Zachmanoglou E.C. The decay of solutions of the uninitial-boundary value problem for the wave equation in unbundled regions // Arch/Rational Mech. Fyd Anal. – 1963. – 14. – P. 312-325. – DOI: org/10.1007/BF00250710.
10. Благовещинский А.С. О характеристической задаче для ультрагиперболического уравнения // Математический сборник. – 1964. – Т. 6. – Вып. 1. – С. 137-168.
11. 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». Т. 1 Физико-математические и технические науки. Ч. 1. – Донецк: ДонНУ, 2019. – С. 27-30. – ISSN: 2664-7370.
12. Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А. Математическая задача об оптимальном управлении струной // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 178-191. – DOI: 10.18522/2311-3103-2020-4-178-191.
13. Клово А.Г., Куповых Г.В., Ляпунова И.А. О возможности синтеза оптимального управления колебаниями струны // Межд. конф. по дифференциальным уравнениям и динамическим системам: тезисы докладов (электронное издание). Сузdal. 3-8 июля 2020 г. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020. – С. 75. – ISBN 978-5-9984-1244-8.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЗОНЫ ГИПЕРГЕНЕЗА ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЯДА ГОРОДОВ РФ

Помеляйко Ирина Сергеевна

Северо-Кавказский федеральный университет, филиал г. Пятигорск
Пятигорск, Россия
i.pomelyayko@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время отсутствует системный подход к оценке экологического состояния населенного пункта. Необходима разработка метода позволяющего системно оценить экологическое состояние городской территории, его динамику, и количественно оценить, как состояние отдельных элементов, так и системы в целом. В основу разработки метода оценки должны быть положены оценочные критерии базирующиеся на предельно-допустимых концентрациях загрязняющих веществ разработанных для различных сред. Альтернативным методом оценки является разработка нового агрегатного критерия антропотехногенной нагрузки (АКАН).

Annotation. Currently, there is no systematic approach to assessing the ecological state of a settlement. It is necessary to develop a method that allows a systematic assessment of the ecological state of an urban area, its dynamics, and quantitatively assess both the state of individual elements and the system as a whole. The development of the assessment method should be based on assessment criteria based on the maximum permissible concentration of pollutants developed for various environments. An alternative assessment method is the development of a new aggregate criterion of anthropotechnogenic load (ACAL).

Ключевые слова: системный анализ, природно-технические системы, курорты КМВ, промышленные города, агрегатный критерий антропотехногенной нагрузки (АКАН).

Keywords: system analysis, natural and technical systems, KMW resorts, industrial cities, aggregate criterion of anthropotechnogenic load (ACAL).

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный город представляет собой сложную локальную природно-техническую систему (ПТС), в которой геосфера в свою очередь связаны друг с другом и образуют стабильную материальную открытую динамическую систему. Такая система отличается от природной возможностью управления. Основываясь из данных мониторинговых исследований, аналитики и расчетов, определяются изменение структуры системы в процессе функционирования, режим во времени, интенсивность, скорость и характер изменения отношений между компонентами, изменение структуры и свойств под влиянием управляющих взаимодействий.

Необходимой основой функционирования ПТС является его удовлетворительное экологическое состояние (ЭС). При этом субъект (населенный пункт, регион) выступает в виде системы природных оболочек, измененных деятельностью человека, задействованных в формировании данного ЭС, и связей между ними. Одним из основных критериев при управлении ПТС является безопасность её для жизнедеятельности и здоровья населения. Давно известно, что «каждый биологический вид (и человек тут не исключение) может жить в довольно узких рамках той среды, к которой он генетически приспособлен. Если среда жизни изменяется быстрее, чем может наступить адаптация или трансформация вида, организм неизбежно умирает. Обычно вначале снижается иммунитет, возникает эволюционная «западня», распространяются новые, ранее неведомые заболевания и становится, не ясно будет ли вообще существовать мир людей в мире природы и каким будет это соотношение» [1].

Оценка территории ПТС, как правило ограничивается оценкой загрязнения атмосферы. Иногда дополнительно оценивают состояние почв. Подобные оценки, как правило не показывают полной реальной картины экологического состояния территории и не отражают воздействие данной ПТС на здоровье населения. Кроме того, к минимуму сводится и набор замеряемых и анализируемых элементов. Лишь при системном анализе экологического состояния территории ПТС можно соблюсти принцип экологического холизма, сформулированный в постулате Коммонера «всё связано со всем». Невозможно сохранение кондиций минеральных вод и лечебных грязей при значительном загрязнении атмосферы, почв, рек и грунтовых вод курортной конурбации.

Целевой функцией данной работы является системный анализ территории ПТС с учетом в первую очередь наиболее опасных экотоксикантов и разработка агрегатного критерия оценки антропотехногенной нагрузки.

II. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор городов осуществлялся таким образом, чтобы предложенный метод оценки антропотехногенной нагрузки был применен при различном, максимальном диапазоне как экономических так и природных условий. С этой целью выбирались города предполагающие как

максимальную антропогенную нагрузку – Москва, Екатеринбург, так и минимальную – Железноводск, Кисловодск. В работе данные города:

1. Представляют все 8 федеральных округов и являются административными центрами 28 субъектов РФ, что составляет 33 % от общего числа (85);

2. Пять из них имеют федеральное значение: города – Москва и Санкт-Петербург; курорты – Кисловодск, Ессентуки, Пятигорск и Железноводск;

3. Входят в 11 из 12 экономических районов России;

4. Охватывают все географические районы РФ;

5. Охватывают зоны с различным потенциалом загрязнения атмосферы (зона низкого ПЗА, зона умеренного ПЗА, зона повышенного ПЗА, зона высокого ПЗА);

6. Большинство из них является крупными либо крупнейшими промышленными центрами, воздушными, речными или морскими портами, узлами железнодорожных и шоссейных дорог.

7. Согласно, принятому по совокупности экологических условий, ранжированию, российские города подразделяются на 5 категорий [2]: 1-я – благополучное экологическое состояние, 2-я – удовлетворительное, 3-я – умеренно напряженное, 4-я напряженное, 5-я – критическое. В основу данной градации был положен ряд признаков, начиная от объема вредных выбросов в атмосферу и водоемы, класса опасности загрязняющих веществ (ЗВ), уровня превышения ПДК поллютантов в воздухе и почвах, до географических условий города.

В данной работе рассмотрены города всех 5 категорий. Они отличаются по своим климатическим, геоморфологическим, геологическим, гидрогеологическим и тектоническим условиям, радиационному фону, плотности населения, количеству стационарных и передвижных источников загрязнения, представляя из себя модели различных вариантов нарушенных под действием техногенного влияния природных сред.

В исследовании было оцено экологическое состояние 35 городов РФ, таких как: Архангельск, Барнаул, Благовещенск, Владивосток, Волгоград, Вологда, Воронеж, Екатеринбург, Ессентуки, Железноводск, Ижевск, Иркутск, Йошкар-Ола, Казань, Кемерово, Кисловодск, Москва, Нижний Новгород, Новосибирск, Новочеркасск, Омск, Оренбург, Пенза, Пермь, Петрозаводск, Пятигорск, Самара, Санкт-Петербург, Саратов, Таганрог, Тольятти, Томск, Ульяновск, Уфа, Челябинск.

III. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью оценки экологической обстановки территории ПТС, был выполнен системный анализ экологического состояния зоны гипергенеза, включающий исследование воздушного бассейна, почв, поверхностных водотоков и радиационного фона. Кроме того, поскольку физико-химические методы указывают лишь на содержание определенных загрязнителей и не могут дать ответа на вопрос о качестве окружающей среды, её пригодности для обитания, был собран и проанализирован материал по эколого-зависимым заболеваниям детского населения и младенческой смертности за 10-летний период (2005–2015 гг.).

По 31 городу анализировались данные взятые из Ежегодников загрязнения атмосферы, почв, поверхностных вод, из сборников «Дозы облучения населения Российской Федерации», из отчетов о государственном мониторинге, из статей в научных журналах ВАК, из отчетов Росприроднадзора и из авторефератов диссертаций и охватывали период с 2006 по 2019 гг.

По оставшимся 4 городам КМВ – Кисловодску, Ессентукам, Железноводску и Пятигорску автором был выполнен экологический мониторинг (ЭМ) природных сред. Данные о концентрации поллютантов в атмосфере курортов получены в НПК «Атмосфера» г. Санкт-Петербург и в Ставропольском Росгидромете.

Важным аспектом оценки экологического состояния территории является отсутствие системного подхода. Так, при оценке загрязнения атмосферного воздуха чаще всего используют индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), либо показатель загрязнения атмосферы К.А. Буштуевой (Катм) [3]. И в том и в другом случае в формулы вводится класс опасности загрязняющего вещества. В первом случае это осуществляется путем расчета безразмерного коэффициента рассчитываемого в зависимости от класса опасности загрязняющего вещества (ЗВ). Во втором, путем умножения величины ПДК на класс опасности анализируемого ЗВ. При оценки ЭС других природных сфер – педосфера, гидросфера, класс опасности веществ входящих в комплексные показатели загрязнения (ИЗВ, УКИЗВ, Zc, Zk) не учитывается. В этом случае, при расчетах нет никакой разницы присутствуют ли в поверхностных и подземных водах и почвах ртуть и бериллий отнесенные к 1 классу опасности, или сульфаты и аммоний относящиеся соответственно к 4 классу опасности. Для системного анализа всего природного комплекса необходимо изучение, как сред-накопителей, так и сред-переносчиков ЗВ. Только в данном случае можно получить достоверную информацию о сложившейся на исследуемой территории экологической ситуации.

Основываясь на данных ВОЗ, МАИР и нормативных документов (НД) действующих на территории РФ к наиболее опасным веществам 1-2 класса относятся: БП, Ве, Hg, Cd, As, Pb, Ni, Zn, нитриты (NO_2). Концентрации данных загрязняющих веществ ЗВ, замерялись в природных средах курортов КМВ в период с 2010 по 2019 гг.

ТАБЛИЦА 1. Вещества отнесенные к чрезвычайно и высоко опасным и определяемые в различных средах курортов КМВ

Среда	Вещество
Атмосфера	Бенз(а)пирен, NO_2^*
Педосфера	As, Cd, Hg, Pb, Zn, Ni,
Гидросфера (реки, подземные воды)	Hg, Be, As, NO_2 , Cd, Pb, Ni, Zn

Помимо них, в почвах, речных и подземных водах определялись показатели радиоактивности. Для почв это – долгоживущие техногенные радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr ; для воды – α и β – радиоактивность. Необходимость определения данных показателей связана с высокими значениями эффективных доз облучения населения в регионе КМВ, которые составляют в среднем 5,86 мЗв/год, при средней суммарной дозе облучения в РФ равной 3,38 мЗв/год.

Подробная методика экологического мониторинга изложена в работах [4–8]. ЭМ включал систематический отбор проб грунтов, поверхностных и подземных вод курортов КМВ на химические, микробиологические и радиологические показатели. Итогом ЭМ курортов КМВ стало определение поллютантов регулярно превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК), фоновые и кларковые значения в природных средах. Рассчитаны показатели позволяющие определить ЭС каждого курорта. Полученные данные свидетельствуют о сильном загрязнении природных сред курортов КМВ. В качестве системной оценки характеризующей экологическое состояние ПТС, определяющей реальную нагрузку на организм человека автор предлагает использовать агрегатный критерий антропотехногенной нагрузки (АКАН). В данном критерии показатели загрязнения различных сред приводятся к их предельно допустимым концентрациям (ПДК) либо, в случае их отсутствия к ориентировочно допустимым концентрациям (ОДК). Нормативы ПДК и ОДК разработаны на основе комплексных экспериментальных исследований опасности опосредованного воздействия вещества на здоровье человека, с учетом его токсичности, эпидемиологических исследований и международного опыта нормирования. В расчетную формулу вводится коэффициент n зависящий от класса опасности данного вещества. Учитывая специфику и народнохозяйственное значение, а также запреты действующие в 1 и 2 зонах санитарной охраны городов-курортов КМВ для них применяется поправочный коэффициент k равный 0,8, данное требование прописано для атмосферы курортных зон [9] и соответственно должно быть распространено на другие природные среды. Расчет агрегатного критерия антропотехногенной нагрузки на территорию ПТС, следующий:

$$АКАН = (K_a + K_b + K_p + K_r) / N, \quad (1)$$

где K_a – критерий загрязнения атмосферы; K_b – критерий загрязнения поверхностных (подземных) вод; K_p – критерий загрязнения почв; K_r – критерий радиационного загрязнения; N – число единиц, соответствующих количеству учтенных пофакторных оценок.

$$K_a = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{k * ПДК_i} \right) * n * P, \quad (2)$$

где C_i – среднегодовая концентрация i -го ЗВ; $ПДК_i$ – его среднесуточная ПДК; k – поправочный коэффициент 0,8, данное требование прописано для зон санитарной охраны курортов [9]; n – коэффициент зависящий от класса опасности данного вещества. Для веществ первого класса опасности, n составляет 1,5; второго – 1,3; третьего – 1; четвертого – 0,85; P – среднегодовая повторяемость направлений ветра по румбу (%) от основных источников загрязнения на селитебную зону.

$$K_b = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{k * ПДК_i} \right) * n \quad (3)$$

где C_i – фактическая концентрация вещества, нормируемого по токсикологическим и органолептическим показателям; $ПДК_i$ – ПДК данного вещества, нормируемого

по токсикологическим и органолептическим показателям; n – коэффициент зависящий от класса опасности данного вещества.

$$K_b = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{k * ПДК_i} \right) * n \quad (4)$$

где C_i – фактическая концентрация нормируемого вещества; $ПДК_i$ – ПДК данного вещества; n – коэффициент зависящий от класса опасности данного вещества.

Для расчета Кр автор предлагает использовать концентрации в почвах долгоживущих радионуклидов, входящих в состав наиболее массивных радиоактивных загрязнений – ^{137}Cs и ^{90}Sr . Вклад почвы в суммарное облучение человека может превышать 60 %. Поскольку почвы являются системой менее динамичной и более буферной, чем атмосферный воздух и при определенных условиях, характерных для конурбации КМВ, обладают способностью аккумулировать загрязняющие вещества, то степень и характер их загрязнения можно использовать как индикатор состояния приземных слоев воздуха. Критерий радиационного загрязнения почв ПТС предлагается рассчитывать по формуле:

$$K_{rad} = \frac{C_1}{C_{1cp\Phi}} + \frac{C_2}{C_{2cp\Phi}} + \dots + \frac{C_n}{C_{ncp\Phi}} \quad (5)$$

где $C_{1,n}$ – фактические концентрации долгоживущих радионуклидов; $C_{1,ncp\Phi}$ – средние по РФ концентрации данных радионуклидов в почве.

Согласно предложенной методике исходя из значения АКАН экологическое состояние территории ПТС можно дифференцировать как:

1. Удовлетворительное (АКАН ниже или равна числу учтенных факторов N);
2. Напряженное ($N < АКАН \leq 2N$);
3. Критическое ($2N < АКАН \leq 3N$);
4. Катастрофическое ($АКАН > 3N$).

IV. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По величине АКАН экологическое состояние территории городов КМВ – напряженное (Кисловодск) и критическое (Ессентуки, Пятигорск, Железноводск). Наибольший вклад в антропотехногенную нагрузку курортов Кисловодск, Ессентуки и Пятигорск вносит загрязнение поверхностных вод – 53–64%; на втором месте загрязнение долгоживущими радионуклидами – 16–33%. В Железноводске долевой вклад радиационного загрязнения максимальен – 50%; на втором месте загрязнение рек 35% (табл. 1).

ТАБЛИЦА 2. ЗНАЧЕНИЯ АКАН В ГОРОДАХ-КУРОРТАХ КМВ

ПТС	Критерий загрязнения среды (К)				АКАН
	K_a	K_b	K_p	K_r	
К	3,39 (11%)	19,93 (64%)	2,93 (9%)	5,08 (16%)	8
Е	2,91 (8%)	19,19 (54%)	1,69 (5%)	11,45 (32%)	9
Ж	2,67 (8%)	11,74 (35%)	2,58 (8%)	16,94 (50%)	9
П	3,06 (8 %)	19,52 (53%)	2,49 (7%)	12,11 (33%)	9

Помимо курортов КМВ АКАН был рассчитан для 31 промышленного города РФ. Расчеты выполнялись по изложенной выше методике. Получены следующие результаты:

Среди данных промышленных городов отсутствуют те, чей АКАН ≤ 4 . К городам с напряженным ЭС ($4 < \text{АКАН} \leq 8$) относятся – Архангельск, Благовещенск, Вологда, Воронеж, Ижевск, Йошкар-Ола, Казань, Оренбург, Нижний Новгород, Петрозаводск, Самара, СПб, Таганрог, Томск. Города с критическим ЭС, где ($8 < \text{АКАН} \leq 12$) – Барнаул, Волгоград, Екатеринбург, Иркутск, Кемерово, Москва, Омск, Новосибирск, Пенза, Пермь, Саратов, Тольятти, Ульяновск, Уфа, Челябинск. К городам с катастрофическим ЭС, с АКАН > 12 относятся Владивосток, Новочеркасск.

Выполненные исследования показывают, что экологическая ситуация региона КМВ весьма неблагополучна, и по ряду показателей соответствует наиболее загрязненным промышленным центрам. Данная ситуация на первый взгляд вызывает удивление, поскольку промышленность гг. Кисловодск, Ессентуки и Железноводск представлена немногочисленными пищевыми и перерабатывающими предприятиями, общая доля выбросов в атмосферу от которых не превышает 10 %. Формированию неблагополучной ЭС способствуют природные особенности городов КМВ. Ниже приведена краткая их характеристика.

Влияние рельефа. Площадь региона КМВ невелика – 5,3 тыс. км². Несмотря на это здесь представлены все основные формы рельефа – горы, котловины, хребты, лощины, седловины. Разнообразие рельефа создает различия в климате городов-курортов и влияет на распределение ЗВ. На пересеченной, холмистой местности (Ессентуки, Пятигорск) на наветренных склонах возникают восходящие, а на подветренных – нисходящие движения. При нисходящих потоках приземные концентрации увеличиваются, при восходящих – уменьшаются. Наиболее неблагоприятной формой рельефа является закрытая горными хребтами котловина аэродинамические коридоры которой обусловлены розой ветров и рельефом и приурочены к поверхностным водотокам (Кисловодск), здесь воздух застаивается, что приводит к накоплению ЗВ вблизи подстилающей поверхности, особенно от низких источников выбросов (автотранспорт).

В данных условиях принявшая огромный размах застройка вдоль, а порой и непосредственно на руслах рек, приводит к локальным геохимическим аномалиям в почвах, реках и донных отложениях.

Влияние климата. Климатические условия каждого курорта конурбации обладают существенными отличительными особенностями. К основным климатическим факторам влияющим на интенсивность рассеивания и аккумуляции продуктов техногенеза относятся: солнечная радиация, определяющая фотохимические превращения примесей и возникновение вторичных продуктов загрязнения; количество и продолжительность осадков, приводящих к вымыванию примесей из атмосферы; скорость ветра, повторяемость штилей; количество дней с туманами. Согласно районированию территории РФ по условиям рассеивания примесей и потенциалу загрязнения атмосферы (ПЗА), территория КМВ характеризуется

повышенным ПЗА (зона II, класс II б¹). В значительной степени достаточно высокий ПЗА связан с атмосферной циркуляцией антициклонического типа, преобладанием низких скоростей ветра (0–1 м/с), повторяемостью приземных инверсий температуры, высокой повторяемостью застоев воздуха, туманами, а также 30–40 % штилей в ночное время.

Преобладают процессы способствующие накоплению примесей на территории курортов. Метеорологические условия для рассеивания примесей неблагоприятные (Кисловодск, Железноводск) и ограниченно благоприятные (Ессентуки, Пятигорск). Микроклимат Кисловодска особенно неблагоприятен для самоочищения атмосферы. Застойный режим, который устанавливается в котловине при низкой аэрации (отсутствии ветров) и хаотичной застройке способствует накоплению загрязнителей на территории города. Анализ данных об относительном вкладе в создание приземных концентраций выбросов городов-курортов КМВ, поступающих в атмосферу в нижнем 30-метровом слое, показал, что основной вклад в формирование уровня загрязнения воздуха дают выбросы, поступающие на высоте 0–10 м (4,3 единицы концентраций из 7,3).

Геологические и гидрогеологические особенности. По сложности геологического строения и гидрогеологических условий Кисловодское, Ессентукское, Пятигорское и Железноводское месторождения минеральных вод отнесены к максимальной 4 группе сложности, поскольку характеризуются исключительно сложными геологическим строением, гидрогеологическими, газогидрохимическими и горно-геологическими условиями. Для месторождений региона КМВ характерна резкая изменчивость распространения в плане и разрезе коллекторов трещиноватых зон в породах различного генезиса. Фундамент разбит системой тектонических разрывных нарушений и осложнен интрузиями кислого состава.

Таким образом, природные факторы курортов КМВ отличаются высокой степенью экологической опасности, способствуют накоплению ЗВ на городской территории, что в условиях возрастающего антропогенного пресса, ведет к деградации климата, гидроминеральной базы, лечебных Тамбуканских грязей и Кисловодского курортного парка.

Помимо природных факторов, на экологическую ситуацию региона негативное влияние оказывает высокая плотность населения в городах курортов, сопоставимая с такими крупными административно-территориальными центрами как: Екатеринбург, Воронеж, Пермь, Уфа, Волгоград и др. Перенаселение территории курортов влечет за собой рост автотранспорта и садово-огородных участков на которых применяются минеральные удобрения и ядохимикаты, увеличение неканализованного жилого сектора, интенсивная застройка в 1 и 2 зонах санитарной охраны, интенсивная вырубка деревьев и др.

На основе сопряженных экогеохимических и медико-статистических исследований выявлены «аэродинамические коридоры» обусловленные розой ветров и рельефом и приуроченные к поверхностным водоемам и водотокам. В данных условиях принявшая огромный размах, неграмотная застройка вдоль, а порой и непосредственно

на руслах рек, приводит к локальным геохимическим аномалиям содержания тяжелых металлов. В реки же происходит сброс стоков от неканализованного жилого сектора (от 10 до 40% населения в разных городах КМВ). Это особенно опасно по причине обнажения на юге и юго-западе водоносных горизонтов на минеральные воды и реальной возможности их прямого химического и бактериологического загрязнения.

Невозможно изменить специфическую метеорологическую обстановку региона КМВ, невозможно, без ущерба для экосистемы, кардинально изменить рельеф данной территории. В данной ситуации колossalное значение приобретает грамотная градопланировочная политика направленная в первую очередь на оптимальную архитектурную компоновку территории каждого конкретного курорта. Сформировавшаяся к настоящему времени планировка городов-курортов способствует накоплению поллютантов в почвах, растениях, поверхностных и подземных водах, растительности. Дальнейшее развитие городского хозяйства курортов КМВ невозможно без разработки методов и средств защиты населения и рекреантов от негативных воздействий и загрязнений городской среды.

Исследования функционирования технических средств и инженерных систем свидетельствует о высоком антропогенном воздействии их на окружающие экосистемы. Одним из примеров является неудачное, с точки зрения экологии, расположении Кисловодской ТЭЦ. Действующая ТЭЦ была построена в 1935 году. Вопросы экологической безопасности объектов строительства в то время были не актуальны и ТЭЦ построили в центре города в самой нижней точке (795,5 м.) рельефа, закрытой котловиной, что учитывая климатические особенности Кисловодска, способствует накоплению ЗВ и формированию локального меридионально вытянутого ореола загрязнения в Центральной общественно-деловой, селитебной и рекреационной зонах города-курорта. Кроме того, ТЭЦ находится на территории 2-й зоны горно-санитарной охраны курорта, в 700 м. от источника Нарзан. Еще одним примером может служить, наиболее высокий суммарный показатель загрязнения почв зафиксированный вблизи железнодорожного полотна, возле питьевого бювета минеральной воды Сульфатный Нарзан. Общая протяженность железной дороги на территории Кисловодска составляет около 5 км (из них 2 км. во 2-й зоне санитарной охраны), ежегодно курорт получает 60 тонн мусора и 1000 м³ сточных вод, кроме того железнодорожные пути формируют ореолы повышенного загрязнения грунтов и грунтовых вод Cd, Mn, Pb, Hg, Ni, Cu. Данную площадь целесообразнее было бы отдать под жилую многоэтажную застройку, переселив в неё население неканализованных южных поселков.

V. АНАЛИЗ ЭКОЛОГО-ЗАВИСИМЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ У ДЕТЕЙ

В середине прошлого века российский учёный-эколог Н.Ф. Реймерс указывал на сбой в принципе Ле Шателье-Брауна: вместо того чтобы всемерно сопротивляться воздействию человека, природа идет по пути саморазрушения. Он отмечал, что «каждый биологический вид (и человек тут не исключение) может жить в довольно узких рамках той среды, к которой он генетически приспособлен. Если среда жизни изменяется быстрее, чем может наступить адаптация или трансформация вида,

организм неизбежно умирает». Данные Росстата показывают стремительное ухудшение здоровья россиян, увеличение числа новорожденных с пороками развития. Число детей, родившихся больными, или заболевших в период новорожденности увеличилось в 2,2 раза (с 17 до 37% всех родившихся), у 30% новорожденных выявлены генетические нарушения. Существующую ситуацию можно обозначить как угрозу национальной безопасности страны. По мнению ряда исследователей (С.В. Алексеев, В.П. Петленко, В.В. Худолей, И.В. Мизгирев, Л.А. Савватеева) от 25 до 50% всех заболеваний можно отнести к влиянию экологических факторов. При сохранении существующих тенденций развития индустрии в ближайшие годы здоровье россиян на 50–70 % будет зависеть от качества среды обитания. Были собраны и проанализированы данные за 10-летний период (2005–2015 гг.) по 9 нозологическим формам (НФ) заболеваний относимым к эколого-зависимым зарегистрированные впервые в жизни у детей (0–14 лет) на 100 000 детского населения. Анализировался показатель младенческой смертности (МС) и следующие НФ: общая заболеваемость (ОЗ); врожденные пороки развития (ВПР); врожденные аномалии системы кровообращения; синдром Дауна (СД); детский церебральный паралич (ДЦП); новообразования (НО); поллиноз, отдельные состояния возникающие в перинатальном периоде. Были рассчитаны средние многолетние значения и темпы прироста. Затем субъекты федерации ранжировались по среднемноголетним значениям и темпам прироста по каждой НФ. Далее они делились на три категории. Экологическое состояние (ЭС) субъектов первой категории, с максимальными значениями, характеризовалось как критическое. Регионы из второй категории соответствовали напряженному ЭС. Субъекты с минимальными значениями были отнесены к относительно благополучным. Далее рассчитывалось, сколько раз из 9 возможных, данный субъект входил в каждую из категорий, исходя из чего определялся уровень благополучия данного региона по частоте и росту эколого-зависимых заболеваний. В целом, наиболее неблагоприятная ситуация складывается в Иркутской, Ульяновской, Амурской, Ростовской и Нижегородской областях. К относительно благополучным можно отнести – республику Башкортостан, Свердловскую, Новосибирскую и Вологодскую области

VI. Выводы

Экологическая ситуация на курортах КМВ близка к критической. Это выражается в накоплении ЗВ в педосфере, наличии веществ 1–2 классов опасности в концентрациях превышающих ПДК, в речных водах, бактериологическом загрязнении верхних водоносных горизонтов, ростом динамических уровней, падением кондиций минеральных вод рабочих горизонтов. Основные причины ухудшения экологической ситуации это – крайне неблагоприятные с позиции самоочищающей способности атмосферы условия: снижение средних скоростей ветра в регионе, уменьшение числа дней с выпадением снега; особенности ландшафта, способствующие накоплению ЗВ в буферных средах и формирующие потенциальные источники загрязнения; увеличение плотности населения; рост автотранспорта; увеличение утечек из инженерных сетей; деградация курортного парка; рост атмосферных осадков, приводящих к разубоживанию продуктивных горизонтов, стоки из не-

канализованных посёлков способствующие бактериологическому загрязнению минеральных вод. При данной ситуации наблюдаются отклонения по общим показателям здоровья, увеличивается число часто болеющих детей, число детей с ВПР и хроническими заболеваниями, нарушениями функционального состояния сердечно-сосудистой системы. В данной ситуации необходимо создание системы экологического мониторинга, и системной оценки экологической ситуации ПТС, повышение уровня защищенности природных сред и снижение риска появления экологически обусловленных заболеваний среди населения.

Агрегатный критерий антропотехногенной нагрузки предложенный в данной работе позволяет не только оценить экологическое состояние территории в целом, выделить наиболее неблагополучные природные среды, оценить вклад каждой среды в комплексное загрязнение, но и оценивает воздействие данной территории на здоровье населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коммонер Б. Замыкающийся круг. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 269 с.
2. Города России: энциклопедия / Гл. ред. Г.М. Лаппо. – М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1998. – 559 с.
3. Унифицированные методы сбора данных, анализа и оценки заболеваемости населения с учетом комплексного действия факторов окружающей среды: Методические рекомендации. – М.: Минздрав России, 1996. – 35 с.
4. Помеляйко И.С., Помеляйко В.И. Комплексная антропотехногенная нагрузка на городскую территорию ряда крупных промышленных городов и курортов федерального значения России // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – М., 2016. – № 1. – С. 47-55.
5. Помеляйко В.И., Помеляйко И.С. Состояние гидроминеральной базы курорта Федерального значения Кисловодска // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – М.: 2012. – № 2. – С. 29-36.
6. Помеляйко И.С., Малков А.В., Першин М.И. Гидроминеральная база Кисловодского месторождения углекислых минеральных вод: проблемы и пути решения // Экология Кавказских Минеральных Вод: системный анализ и концептуальные подходы. – СПб-Пятигорск: Изд-во ПФ СКФУ, 2016. – С. 163-177.
7. Помеляйко И.С. Определение комплексной антропотехногенной нагрузки на городскую территорию ряда городов РФ // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Вып. 18: Материалы годичной сессии Научного совета РАН. – М.: РУДН, 2016. – С. 340-345.
8. Помеляйко И.С. Эколо-геохимическое ранжирование селитебных зон ряда курортных и промышленных городов РФ по трем оценочным показателям загрязнения почв // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2017. – № 1. – С. 28-39.
9. СанПиН 2.1.3684-21 "Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий". – М.: 2021. – 75 с.

Секция II

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

DOI: 10.18522/syssyn-2021-15

Интеллектуальные информационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов

Подоплёткин Юрий Федорович
Научно-исследовательская лаборатория
обеспечения инновационных
разработок
АО «Концерн «Гранит-Электрон»
Санкт-Петербург, Россия
office@granit-electron.ru

Соловьева Валентина Владимировна
Научно-исследовательская лаборатория
обеспечения инновационных
разработок
АО «Концерн «Гранит-Электрон»
Санкт-Петербург, Россия
office@granit-electron.ru

Толмачев Сергей Геннадьевич
Научно-исследовательская лаборатория
обеспечения инновационных
разработок
АО «Концерн «Гранит-Электрон»
Санкт-Петербург, Россия
office@granit-electron.ru

Шаров Сергей Николаевич
Научно-исследовательская лаборатория
обеспечения инновационных
разработок
АО «Концерн «Гранит-Электрон»
Санкт-Петербург, Россия
office@granit-electron.ru

Аннотация. Обзор направлений использования методов искусственного интеллекта [1] для модернизации и повышения эффективности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), начиная с систем, информационного обеспечения полёта задания, выбора параметров сложных зондирующих сигналов, первичной и вторичной обработки эхо-сигналов, опознания наблюдаемых объектов для повышения помехозащищённости бортовой аппаратуры, а также особенностей групповой работы летательных аппаратов.

Annotation. Overview of the directions of the use of artificial intelligence methods to modernize and improve the efficiency of unmanned aerial vehicles (UAVs), starting with systems, information support for flight missions, selection of parameters of complex sounding signals, primary and secondary processing of echo signals, identification of observed objects to increase interference with the on-board equipment, as well as features of group work of aircraft.

Ключевые слова: Методы искусственного интеллекта, обработка информации по признакам эхо-сигналов, мониторинг морской поверхности.

Keywords: Artificial intelligence techniques, information processing on the sign of echo signals, monitoring of the sea surface.

I. ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ КОНТУРЫ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ СУДОВ

В состав комплексов универсальных БПЛА [1] входят многофункциональные радиоэлектронные комплексы (МРЭК) освещения надводной обстановки (ОНО), автоматизированные системы управления носителя (АСУН) и бортовые автономные системы управления (БАСУ).

МРЭК ОНО решают задачи:

- помехозащищенное скрытое ОНО активными и пассивными радиолокационными средствами;
- обнаружение, автоматического сопровождения, определения координат и параметров движения надводных объектов-целей;
- обнаружения, распознавания и определения координат объектов по излучениям их радиоэлектронных средств;
- выработка и выдача информации о надводной обстановке в КАСУ и в информационно-управляющую систему (ИУС) корабля-носителя БПЛА;

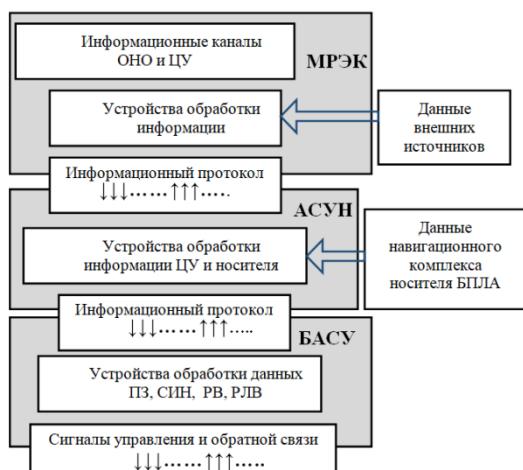
- взаимодействия с внешними источниками информации, которыми могут быть корабли, авиационные и космические средства мониторинга и др.

АСУН решают задачи:

- приема и обработки информации от системы ОНО, навигационного комплекса (НК), ИУС корабля;
- выработки данных полётного задания (ПЗ) для системы управления БПЛА;
- организации одиночного или группового использования БПЛА и др.

Средства ОНО носителя совместно с бортовой информационными системами управления БПЛА составляют единый информационно-управляющий комплекс, который, в свою очередь, состоит из трех самостоятельных контуров (рис. 1):

- контура целеуказания, объединяющего априорную и текущую информацию о количестве и координатах целей, их типе, а также дополнительные сведения об обстановке в районе их нахождения;
- корабельного контура системы управления оружием, в котором по информации о ЦУ, текущем положении корабля-носителя ПКР и в соответствии с поставленной боевой задачей производится выработка полетного задания при групповом использовании ПКР;
- бортового контура системы управления ПКР, обеспечивающего высокоточное наведение ракеты в заданную цель.



Rис. 1

Поскольку решение перечисленных задач осуществляется в жестких временных рамках в условиях противодействия, обработка информации в этих контурах требует высокопроизводительных интеллектуальных алгоритмов.

II. МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИНФОРМАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ БПЛА

Междисциплинарное направление исследований, известное под названием «искусственный интеллект» (ИИ), сформировалось в середине XX века и в настоящее время развивается по многим направлениям, зачастую мало связанным между собой. Традиционными задачами ИИ считаются задачи распознавания образов, задачи принятия многокритериальных решений в условиях неопределенности исходной информации, задачи эвристического поиска целевых состояний и др. В области ИИ сложилась своя терминология и понятийный аппарат, который нужно сопоставить с рассматриваемыми объектами СУ БПЛА. Известен ряд определений интеллектуальных систем и отличительных признаков ИИ, из которых наиболее известным является классический тест А. Тьюринга. По отношению к рассматриваемой области, наиболее близким по смыслу является определение академика Н.Н. Моисеева [6]: «Интеллект – это, прежде всего, целеполагание, планирование ресурсов и построение стратегии достижения цели, а также способность контролировать свои действия по достижению цели с учетом совпадения желаемого и действительного». Из этого следует, что система с ИИ (с элементами ИИ) должна обладать свойством целесустребленности. Целевые установки могут задаваться в форме требований перехода системы из начального в заданное (целевое) состояние, а в качестве критерия эффективности использовать условная стоимость этих переходов. Применительно к интеллектуальной СУ БПЛА начальное состояние характеризуется координатами цели, средств противодействия, а целевое состояние – совпадением координат цели и БПЛА. Характерной особенностью систем ИИ военного назначения является необходимость принятия решений в условиях, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы и разной степени достоверности [7].

Планирование ресурсов и построение стратегии достижения цели в системах ИИ базируется на знаниях о предметной области, в данном случае - в области использования вооружения ВМФ. Под знаниями обычно понимают закономерности этой области (свойства объектов, их связи, правила и т.д.), выявленные в результате практической деятельности и полученные на основе профессионального опыта специалистов. Использование этих знаний предполагает их формализацию в рамках некоторой модели представления знаний. Наиболее полезные модели представления знаний имеют эвристический характер.

Процессы, происходящие в интеллектуальной среде, принято рассматривать в форме взаимодействия интеллектуальных агентов (ИА), под которыми понимаются аппаратные или программные сущности, способные действовать для достижения целей, сформулированных владельцем агента [8],

В рамках этой терминологии ИА воспринимает свою среду, получая информацию о ней с помощью датчиков, формирует управляющее воздействие на основе имеющихся у него знаний и механизмов логического вывода

и воздействует на среду с помощью исполнительных механизмов. Воздействие может быть, как физическим (ракета поражает цель), так и информационным (формируется протокол ЦУ или ставится искусственная помеха). В многоагентной системе информационное взаимодействие между ИА носит либо согласованный, либо антагонистический характер.

Все компоненты комплекса БПЛА функционируют согласованно для решения поставленной целевой задачи. В условиях организованного противником радиоэлектронного противодействия (РЭП) взаимодействие своих ИА и ИА противника носит антагонистический характер в силу противооположности целевых установок. Целевые установки БПЛА сводятся к решению задач обнаружения, распознавания заданных объектов, ЦУ и наведения на них. Целевые установки ИА противника призваны обеспечить защиту этих объектов путем РЭП и организации противовоздушной обороны.

III. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БПЛА КАК СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

СУ БПЛА изначально является интеллектуальной системой в силу наличия у нее всех признаков ИИ. На рис. 2 приведена упрощенная схема взаимодействия компонентов СУ ПКР, каждую из которых можно рассматривать в качестве ИА.

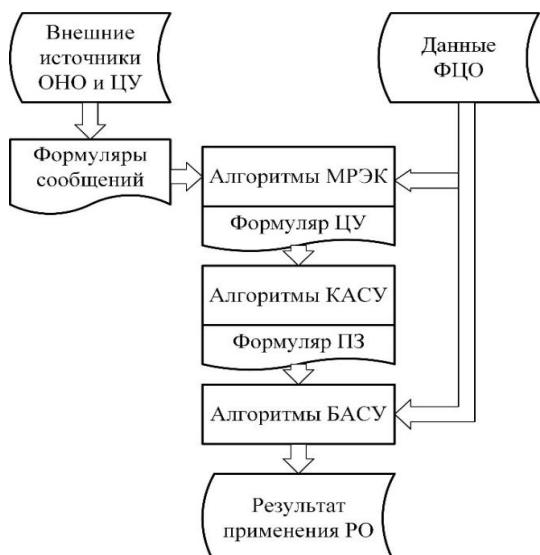


Рис. 2

Интеллектуальный агент МРЭК ОНО оказывает информационное воздействие на среду, формируя протокол ЦУ, направляемый в АСУН, которая в свою очередь осуществляет, как информационное воздействие на среду в виде формирования ПЗ, вводимого в БАСУ БПЛА, так и физическое воздействие, управляя пуском невозможность предусмотреть все возможные ситуации (состояния среды) использования БПЛА;

- отсутствие достоверных знаний об отличительных признаках целей, технических характеристиках средств противодействия БПЛА и методиках их применения;

БПЛА. БАСУ, в конечном итоге, обеспечивает выполнение целевой установки всей СУ носителя БПЛА.

Основными аргументами для применения методов ИИ являются:

- постоянные изменения параметров среды, в которой функционируют элементы СУ БПЛА, обусловленные появлением новых типов объектов-целей, снижением их ЭПР, появлением скоростных объектов, совершенствованием средств противодействия и пр.;
- увеличение скорости летательных аппаратов, появление гиперзвуковых средств поражения, уменьшение времени на анализ ситуации и принятие решения;
- уменьшение численности экипажа на кораблях и судах нового типа, появление безэкипажных носителей БПЛА.
- невозможность предусмотреть все возможные ситуации (состояния среды) использования БПЛА;
- отсутствие достоверных знаний об отличительных признаках целей, технических характеристиках средств противодействия БПЛА и методиках их применения;

Вместе с тем, совершенствуются средства обнаружения целей и обработки информации, появляется возможность формирования и использования баз знаний об объектах среды, что создает предпосылки для разработки интеллектуальных алгоритмов. Анализ современных технологий ИИ позволяет найти их применение в задачах, решаемых комплексами БПЛА (некоторые из них приведены в табл. 1).

ТАБЛИЦА 1

№	Методы ИИ	Применение в задачах управления БПЛА
1	Экспертные продукционные системы	Выбор параметров траектории полета БПЛА, техническая диагностика устройств комплексов БПЛА
2	Нейросетевые методы	Классификация целей и помех, прогнозирование физических процессов, определяющих условия полета, выявление закономерностей в данных ОНО
3	Генетические алгоритмы	Параметрическая оптимизация ансамблей зондирующих сигналов
4	Методы теории возможностей, теории свидетельств	Отождествление разнородных данных от различных источников
5	Многокритериальные методы принятия решений в условиях неопределенности исходных данных	Параметрическая оптимизация траекторий полета БПЛА

Рассмотрим компоненты СУ БПЛА с точки зрения возможности и целесообразности использования в них методов ИИ.

IV. МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ МРЭК

Обработка информации в МРЭК ОНО и ЦУ условно разделяется на алгоритмы обработки информации активного и пассивного радиолокационных каналов (АРК и ПРК), алгоритмы обработки информации, поступающей от внешних источников (ВИ), и алгоритмы межканальной обработки информации и формирования формулера ЦУ (рис. 3).

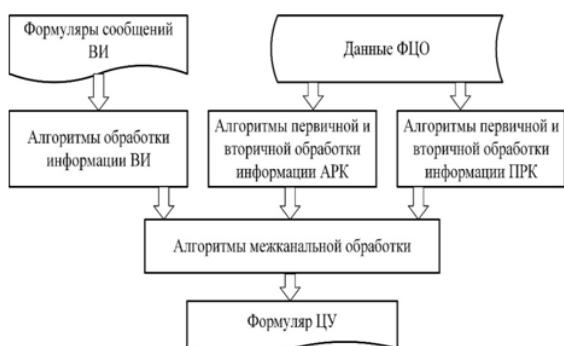


Рис. 3

Первичная и вторичная обработка информации ВИ, АРК и ПРК является стандартной для этого типа систем. Формуляры сообщений от ВИ содержат информацию об обнаруженных источниках радиоизлучений (ИР) и координатах НЦ в системе координат, связанной с этим ВИ. МРЭК реализует пересчёт координат местоположения ВИ и обнаруженных им НЦ в систему координат носителя МРЭК, компенсацию расхождения координат и параметров движения целей, получаемых от разных источников.

Первичная обработка информации АРК и ПРК заключается в обнаружении полезного сигнала на фоне естественных и искусственных помех. В результате вторичной обработки информации АРК формируются сглаженные оценки дальности, пеленга и параметров движения объектов-целей. Результатом вторичной обработки информации ПРК является определение пеленга и дальности до ИР, а также определение типов корабельных РЛС, классов их носителей и типов корабельных группировок. Методы ИИ целесообразно использовать в алгоритмах межканальной обработки информации для решения задач:

- отождествления целей по данным АРК, ПРК и ВИ;
- классификации объектов с источниками радиоизлучения по данным ПРК и ВИ;
- формирования формуляра ЦУ, содержащего интегральную информацию о параметрах обнаруженных групповых и одиночных целей, необходимую для ПКР.

Задача отождествления объектов-целей по информации от нескольких источников использует в качестве исходных данных приведенные к единому моменту времени значения дальности и пеленга на каждую цель, СКО измерения этих параметров, вероятности принадлежности целей к одной из категорий (классу) типа «большой», «средний» или «малый» корабль. Значения перечисленных параметров образуют область неопределенности для каждой цели, схематично изображенную на рис. 4 (пример информации от двух источников об обнаруженных объектах), где a_i – цели, обнаруженные первым источником, например, АРК, b_i – цели, обнаруженные вторым источником, например, ПРК.

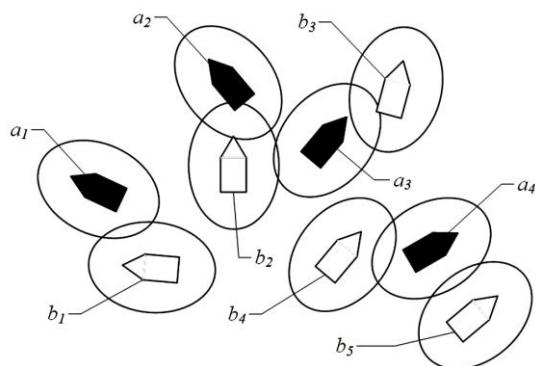


Рис. 4

Типовые алгоритмы отождествления основаны на определении пар целей, для которых вероятность гипотезы об их тождественности превышает заданный пороговый уровень. Для расчета вероятности гипотезы, как правило, используются байесовские методы [1: 9, 10]. Тождественность определяется путем сравнения разности оценок параметров целей с заданным допуском (разделяющим стробом). При наличии различных вариантов отождествления, выбирается вариант с минимальным евклидовым расстоянием между целями.

Методы и алгоритмы ИИ, разработанные для задач коллективного распознавания, позволяют повысить достоверность результатов отождествления и классификации за счет введения меры доверия для каждого источника. Под коллективным распознаванием обычно понимается задача использования нескольких классификаторов (в данном случае АРК и ПРК), каждый из которых принимает решение о классе одного и того же объекта, с последующим объединением и согласованием решений отдельных классификаторов.

Предполагается, что каждый i -й классификатор может иметь выход в форме вектора решений размерности n с мерой неопределенности $\mu_k = p_{ik}(x_i)$, где $k = 1, \dots, n$, n – количество меток классов, x_i – вектор измерений (признаков) i -го классификатора. Для согласования решений двух и более классификаторов может быть использован математический аппарат теории свидетельств Демпстера-Шефера (ТДШ).

Известно, что в байесовской теории, апостериорная вероятность изменяется по мере приобретения новых свидетельств. Аналогичным образом, в ТДШ может изменяться степень доверия к свидетельству – m , которую принято называть массой. Основным отличием ТДШ от теории вероятностей является трактовка понятия незнания.

В теории вероятностей все, что не обосновывает гипотезу, должно ее опровергать, поэтому необходимо принудительно присваивать некоторую вероятность отрицанию гипотезы, даже при отсутствии свидетельства, относящегося к ее отрицанию. Тогда сумма вероятностей принадлежности цели к категориям «большой», «средний» и «малый» корабль должна быть равна 1.

В ТДШ масса присваивается только тем классам (категориям), которым желательно назначить некоторую степень доверия. Не присвоенная масса относится на

незнание. Ключевым моментом согласования решений двух и более классификаторов является правило получения комбинированной массы, в соответствии с которым определяется класс, имеющий наибольшую массу доверия:

$$m_1 \oplus m_2(C) = \sum m_1(A)m_2(B) \text{ при условии } A \cap B = C,$$

где $m_1(A)$, $m_2(B)$ – меры доверия к результатам классификации, выполненной первым и вторым информационными каналами, соответственно.

Исходные меры доверия для каждого информационного канала зависят от условий наблюдения целей и ошибок измерений их параметров.

V. МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ АСУН

Обработка информации в КАСУ (рис. 5) условно разделяется на алгоритмы обработки данных ЦУ, данных корабельного навигационного комплекса (НК), алгоритмы обеспечения ручного ввода данных оператором, алгоритмы формирования ПЗ и обеспечения предстартовой подготовки (ПП).



Рис. 5

На основе данных ЦУ определяются координаты НЦ, параметры ее движения и погрешности этих величин на текущий момент времени. Для групповой цели определяется радиус ее ядра. На основе данных НК корабля определяются его координаты, параметры движения, погрешности этих величин и параметры качки на текущий момент времени.

Методы ИИ целесообразно использовать в следующих алгоритмах обработки информации в КАСУ:

- алгоритмах расчета точки прицеливания, выбора параметров траектории и определения параметров залпа;
- алгоритмах проверки условий разрешения старта БПЛА.

Расчет точки прицеливания связан с расчетом наиболее вероятного местоположения цели на текущий момент времени (расчетное место цели – РМЦ) и на момент начала обзора пространства ГСН (упрежденное место цели – УМЦ). Результаты расчета координат РМЦ и УМЦ влияют на выбор параметров траектории ПКР.

Вид и параметры траектории ПКР в вертикальной плоскости обусловлены требованиями минимизации вероятности ее обнаружения средствами ПВО противника и обеспечения заданной вероятности нахождения цели в зоне обзора ГСН ПКР. Как правило, используется один из типовых вариантов. Вид и параметры траектории ПКР в горизонтальной плоскости определяются необходимостью обхода естественных препятствий, минимизации вероятности нахождения в зоне средств ПВО противника и обеспечения наиболее благоприятных ракурсов обзора цели бортовой ГСН.

На рис. 6 обозначены точки разворота БПЛА в горизонтальной hp_i и вертикальной vp_i плоскостях, центры окружностей циркуляции c_i и радиус предполагаемой зоны противодействия r_{pro} .

В общем виде это задача многокритериального выбора из множества альтернативных вариантов в условиях неопределенности, обусловленной устареванием неполной и неточной информации, получаемой от систем ОНО и ЦУ.

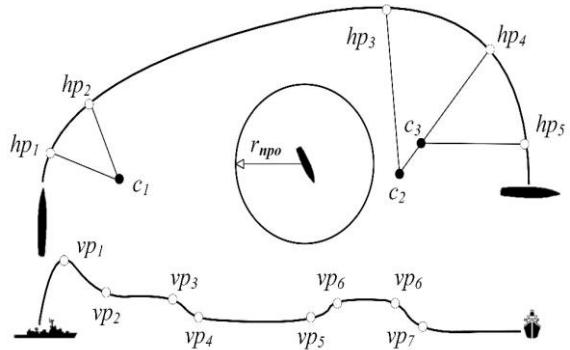


Рис. 6

Условно задачу можно разделить на два этапа: формирование вариантов и их ранжирование в соответствии с заданными приоритетами. Варианты траекторий могут быть сформированы традиционными алгоритмами КАСУ на основании данных, введенных вручную и/или полученных от внешних и корабельных систем.

Задача второго этапа сводится к оптимизации целевого функционала вида:

$$\max F(a \in A_k, b \in B_i, c \in C_h), \quad f(a, b, c) \leq 0,$$

где a – элемент массива конструктивных параметров;

b – элемент массива изменяемых параметров;

c – элемент массива неопределенных параметров;

f – функция ограничений;

A_k , B_i , C_h – массивы изменения переменных a , b , c , соответственно; целевой функционал F – мера, характеризующая каждый вариант траектории. Это может быть вероятность (степень уверенности) нахождения цели в зоне, достигаемой ПКР и просматриваемой бортовым координатором.

Ограничения в виде неравенств f представляют собой математические формулировки конструктивных ограничений на дальность полета ПКР, дальность обнаружения цели, допустимые перегрузки и др. Массив A_k включает в себя параметры модели бортовой БАСУ.

Массив B_i содержит параметры ПЗ, определяющие тип траектории и ее характеристики (координаты точек и радиусы разворота в вертикальной и горизонтальной плоскостях, высоту полета и т.д.).

Массив C_h содержит параметры носителя ПКР (н) и цели (ц) (рис. 7): ее координаты ($X_{ц}$, $Y_{ц}$), курс ($K_{ц}$), скорость ($V_{ц}$), дальность (D_o), пеленг (P_o), состав группы, радиус ее ядра и т.д. В большинстве случаев закон распределения параметров c и соответствующие им значения разброса $\sigma_{X_{ц}}$, $\sigma_{Y_{ц}}$, $\sigma_{V_{ц}}$, $\sigma_{K_{ц}}$, σ_D , σ_{P_o} неизвестны, но можно предполагать, что их значения принадлежат некоторой области дискретных значений.

Область неопределенности может быть уменьшена за счет использования априорной информации о параметрах движения обнаруженных одиночных или групповых целей.

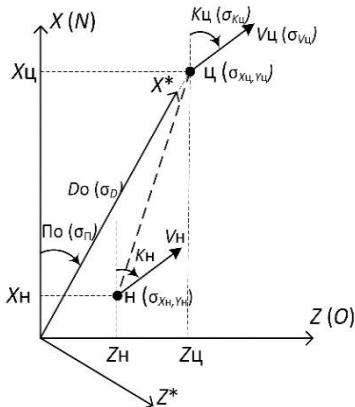


Рис. 7

Формальное описание неопределенности параметров массива c реализуется функциями принадлежности нечетких множеств или вероятностными характеристиками.

Формализованное описание модели задачи многокритериального выбора варианта траектории можно представить в виде:

$$\langle A, X, K, S, P, D \rangle,$$

где A – множество допустимых альтернатив $\{a_1, \dots, a_b, \dots, a_m\}$, где под альтернативой понимается вариант траектории, удовлетворяющий ограничениям задачи и являющийся способом достижения поставленной цели; X – множество исходов $\{x_1, \dots, x_b, \dots, x_n\}$, отражающих степень достижения поставленной цели; $K(k_1, \dots, k_b, \dots, k_l)$ – векторный критерий оценки исходов по различным показателям; S – множество шкал измерения для составляющих критерия K ; P – решающее правило выбора альтернативы. В условиях неопределенности исходных данных оценка исхода по каждой альтернативе может иметь характер нечеткой или вероятностной оценки.

Пуск БПЛА может осуществляться в сложных метеорологических условиях, поэтому одним из условий для разрешения старта является ограничение на значения параметров качки корабля. Превышение пороговых значений углов и угловых ускорений бортовой и килевой качки в течение определенного временного интервала влечет формирование команды на запрет старта. Для вы-

бора наиболее благоприятных условий старта имеет смысл реализовать прогнозный алгоритм обработки измеряемых данных носителя БПЛА, обеспечивающий определение временного интервала безопасного старта, в течение которого параметры качки находятся в пределах допустимых значений.

Прогноз должен обеспечивать определение моментов начала и конца искомых интервалов t_h , t_k – рис. 8 (пример записи килевой качки корабля).

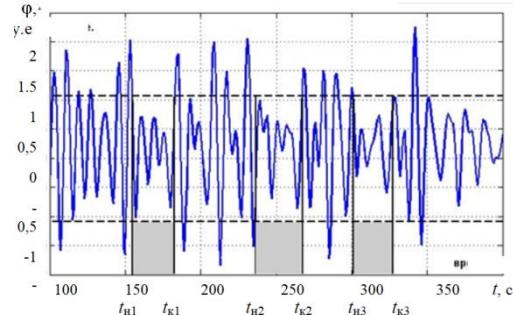


Рис. 8

Алгоритм может быть построен на базе математического аппарата методов оптимальной фильтрации или нейросетевых методов. Адаптация параметров прогнозного алгоритма осуществляется постоянно на основе измеряемых текущих значений параметров

V. МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ БАСУ БПЛА

Обработка информации в БАСУ включает ряд взаимосвязанных алгоритмов, обеспечивающих управление движением ракеты по заданному маршруту, например, режим сближения или самонаведения (СН) на основании данных системы инерциальной навигации (СИН), радиовысотомера (РВ), ГСН и введенных параметров ПЗ (рис. 9).



Рис. 9

Методы ИИ целесообразно использовать в задачах классификации объектов, обнаруженных информационными каналами ПКР, и при выборе параметров зондирующих сигналов АРК.

Задача классификации обнаруженных объектов решается путем анализа их признаков. В частном случае эта задача сводится к селекции – разделению всех объектов на цели и помехи (ложные цели). Традиционные

способы селекции используют ограниченный набор признаков – параметры флуктуации отраженных сигналов, геометрические или спектральные признаки.

Методы ИИ ориентированы на построение классификаторов, использующих многомерный массив признаков. В общем виде задача заключается в формировании интеллектуального классификатора, на вход которого поступает сложная радиолокационная картина надводной обстановки, включающая в себя как реальные, так и ложные цели, а на выходе остаются только реальные цели.

При разработке радиолокационных РЛВ активного типа наряду с обеспечением требований помехоустойчивости и скрытности их функционирования большое внимание уделяется наличию определенных свойств зондирующих сигналов, обеспечивающих выделение информативных признаков обнаруживаемых объектов. На практике широко применяются сложные шумоподобные сигналы, использующие дискретные кодовые последовательности (КП) для модулирования несущей частоты излучения [1: 12–14, 15, 16–20, 21–24].

Частным случаем шумоподобных сигналов являются фазоманипулированные сигналы. Последовательность фаз (0 или π) сигналов в отдельных квантах можно представить в виде соответствующей КП чисел (кодов) « $+1$ » или « -1 ». Одной из актуальных задач является задача синтеза ансамблей бинарных КП с требуемыми свойствами их автокорреляционной функции (АКФ). В частности, одна из важнейших характеристик – уровень боковых лепестков (БЛ) АКФ сигнала. Актуальная задача формирования ансамблей КП для синтеза сложных зондирующих сигналов с минимальным уровнем БЛ может быть решена целенаправленным поиском, используемым генетическими алгоритмами [1: 8, 11]

VI. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ И КЛАССИФИКАЦИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Задача автоматической селекции (распознавания) цели по совокупности значений ряда её признаков на фоне естественных и искусственных помех, рассматриваемая с формальных позиций, представляет собой типичную задачу классификации некоторого множества объектов, каждому из которых соответствует вектор значений признаков, свойственных тому или иному заданному (известному) классу объектов.

Отнесение объекта к одному из классов в настоящее время обычно производится вычислением близости вектора значений его признаков к эталонным векторам объектов разного класса и выбором ближайшего в пространстве признаков класса. Простейшая мера близости объектов – квадрат евклидового расстояния между векторами значений их признаков (очевидно, что чем меньше это расстояние, тем ближе расположены объекты в пространстве признаков). Соответствующее определение признаков типового объекта – среднее арифметическое значение признаков по выборке, представляющей класс. Другая мера близости, естественно возникающая при анализе сигналов, – квадрат коэффициента корреляции (чем он больше, тем ближе объекты) [1: 26].

В отличие от традиционных методов обработки информации нейросети с успехом могут применяться при недостатке эмпирических данных для проведения статистического исследования. Кроме того, значительным преимуществом применения ИНС для решения задач классификации является возможность распознавания объектов по сравнительно небольшому набору признаков (количество которых может быть соизмеримо с числом объектов классификации), в том числе плохо формализуемых, а также имеющих высокую плотность случайных пропусков значений исследуемых признаков. Нейросетевые модели налагают слабые ограничения на возможные функции распределения переменных и позволяют не использовать априорные гипотезы о виде этих функций и структуре модели.

Как правило, ИНС оказываются эффективным способом классификации объектов, так как в процессе функционирования нейросеть фактически генерирует большое количество регрессионных моделей (подобных тем, которые используются в решении задач классификации традиционными статистическими методами).

Среди других немаловажных достоинств ИНС обычно выделяют [1: 27–29, 30]:

- устойчивость при работе с зашумленными и недостоверными данными;
- автоматическую подстройку параметров нейросетевой модели на обучающих примерах решения задачи;
- гибкость, возможность адаптации (дообучения) ИНС к изменениям действующих (учитываемых) факторов и диапазонов их значений;
- высокий параллелизм, свойственный нейросетевым моделям;
- способность эффективно обрабатывать разнотипные данные высокой размерности.

Разработку ИНС, как показывает накопленный опыт, целесообразно начинать с оценки возможности применения для решения поставленной задачи одной из известных и успешно апробированных на практике конфигураций нейросети (многослойный персептрон, радиально базисные, рекуррентные и др.). Если эффективное решение задачи не обеспечивается ни одним из известных типов ИНС, то тогда возникает необходимость конструирования ИНС новой, не имеющей прототипа конфигурации.

Исходя из этого, для исследования возможности применения нейросетевого подхода к анализу фоновоцелевой обстановки и селекции целей по совокупности значений ряда её признаков на фоне естественных и искусственных помех, было проведено исследование [1: 26], которое включало: изучение, анализ и количество входных количественных переменных ИНС для решения данной задачи было установлено по числу признаков, по которым осуществляется распознавание объектов классификации. Выходными категориальными переменными в данной задаче являются дискретные величины классификатора «тип объекта»,

Для выбора исходной типовой топологии ИНС проводился информационный поиск [1: 31, 26, 30], который показал, что при решении задач классификации в зависимости от их сложности могут использоваться ИНС типа многослойный персепtron или радиально-базисные нейросети. Так как сущность классификации объекта заключается в установлении соответствия вектора значений его признаков эталонным значениям признаков объекта того или иного класса из заданного перечня, то для обучения ИНС используется метод контролируемого обучения.

Был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого моделировалось 20 вариантов ИНС двух типов (многослойная полностью связная сеть и сеть с радиально-базисными функциями) при различных сочетаниях их параметров. Все они обучались на одной предварительно сформированной обучающей выборке, а затем тестировались на тестовых примерах (каждый из примеров представлял собой находящийся в однозначном соответствии набор значений входных переменных ИНС со значением выходной переменной).

Анализ результатов разработки интеллектуального классификатора для решения задач классификации и селекции объектов надводной обстановки позволяет сделать следующие основные выводы и сформировать предложения по использованию нейросетевых технологий в перспективных системах управления БПЛА с применением РЛ со сложными сигналами [1: 26].

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важно отметить, что в настоящее время технологии интеллектуальных систем являются определяющим направлением в задаче создания современных систем управления ПКР. Характерными признаками интеллектуальной системы являются наличие целевой установки, возможность управления ресурсами системы для построения стратегии достижения цели и обратная связь для контроля результатов своих действий. Необходимость использования методов ИИ в системах управления диктуется прогрессом в области средств противодействия информационным системам, а также неопределенностью, многозначностью возникающих ситуаций, их слабой формализацией и зависимостью от многих параметров, многовариантностью принимаемых решений в сложных динамических ситуациях в реальном масштабе времени. Предпосылкой для внедрения со-

временных методов ИИ служит технический прогресс в области вычислительной техники, микроэлектронных средств и алгоритмов обработки сигналов.

Использование методов ИИ повышает эффективность решения не только частных задач аппаратуры на отдельных этапах функционирования АСУН и БАСУ, но и эффективность сопровождения комплексов приборов на всех этапах жизненного цикла [1: 4].

Еще одно свойство должно быть учтено в современных ПКР типа ПКР. Они должны быть универсальными по целеназначению, т.е. наводиться как на надводные цели, так и на береговые. Наведение на радиоконтрастные береговые цели практически совпадает с наведением на надводные цели, но требует специального программного обеспечения. А вот наведение на неконтрастные цели требует специальных методов, основанных на использовании информации от аппаратуры спутниковой навигации или корректировки координат точки наведения с использованием координат известного ориентира, а также методов искусственного интеллекта для распознавания наблюданной информационными каналами фондоцелевой обстановки.

При отсутствии этих возможностей в структуру информационно-управляющей системы может быть введен канал экстремально-корреляционного наведения с использованием оптических датчиков на борту ПКР, информация которых сравнивается с эталоном, переданным на борт через полетное задание.

Важным научным перспективным направлением сегодняшнего дня является разработка корабельной и бортовой аппаратуры на базе искусственного интеллекта. Это позволит в памяти информационно-управляющих систем не только иметь все многообразие возможных вариантов решения о применении любого оружия и технических средств, но и иметь возможность принимать оптимальное решение при эксплуатации корабельной и бортовой аппаратуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подоплекин Ю.Ф. Соловьев В.В., Толмачев С.Г., Шаров С.Н. Интеллектуальные информационные управляющие системы со сложными локационными сигналами для беспилотных летательных аппаратов. – СПб.. БГТУ «ВОЕНМЕХ», АО «Концерн «Гранит-Электрон», РААН, 2020. – 244 с.

Big Data vs Big Systems

Витковский Владимир Валентинович
Лаборатория информатики
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия
vvv@sao.ru

Горохов Владимир Леонидович
Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
г. Санкт-Петербург, Россия
vgorohov@mail.ru

Марухно Андрей Сергеевич
Лаборатория информатики
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия
mas@sao.ru

Комаринский Сергей Леонидович
Лаборатория информатики
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия
slkom@sao.ru

Величко Алексей Михайлович
Лаборатория информатики
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия
vam@sao.ru

Аннотация. В предлагаемой работе обсуждается проблема изучения сложных иерархических систем (Big Systems) методами и технологиями адекватными порождаемыми этими системами большими объёмами данных (Big Data). В настоящее время проблема создания технологий усвоения Big Data, включая сбор, обработку, анализ, хранение и обеспечение доступа к ним и к адекватным средствам их обработки, является центральной во всех областях экспериментальной науки. Задача совместной обработки и анализа разнородных многомерных данных, равно как данных с ошибками, пропусками и искажениями, является особенно актуальной. В работе представлены проведённые исследования и развитие технологии когнитивной визуализации для анализа больших объёмов гетерогенных экспериментальных данных.

Annotation. The proposed paper discusses the problem of studying complex hierarchical systems (Big Systems) by methods and technologies adequate to the large amounts of data generated by these systems (Big Data). Currently, the problem of creating technologies for assimilation of Big Data, including collecting, processing, analyzing, storing and providing access to them and to adequate means of processing them, is central in all areas of experimental science. The task of joint processing and analysis of heterogeneous multidimensional data, as well as data with errors, omissions and distortions, is especially relevant. The paper presents the research and development of cognitive visualization technology for the analysis of large volumes of heterogeneous experimental data.

Ключевые слова: Методы и технологии обработки и анализа гетерогенных Big Data, интеллектуальный анализ больших систем, когнитивные технологии, алгоритмы и программные комплексы

Keywords: Methods and technologies for processing and analyzing heterogeneous Big Data, intelligent analysis of large systems, cognitive technologies, algorithms and software complexes

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема извлечения знаний, доступных для восприятия человеком, из больших массивов цифровой информации была сформулирована Клиффордом Линчем [1] в 2008 году и получила название Big Data. Характеризация этой проблемы определялась формулой 3V: volume, velocity, variety (объем—скорость—разнообразие).

В науке с начала 21-го века происходит третья «революция» в экспериментальных данных. Это касается способов представления информации, методов накопления, объемов данных, а также обработки и анализа наблюдений. Поменялись способы и технологические средства, применяемые при хранении данных, изменились и способы обмена информацией. Анализ больших объемов данных остаётся сложной, трудоёмкой и ресурсоёмкой задачей. Очевидно, что даже простой обзор такого объема данных превышает возможности человека, а эффективное использование процедур автоматического анализа всего объема данных требует предварительного знания закономерностей для построения алгоритмов выбора и анализа.

В связи с этим быстро развивается программный инструментарий, включающий многообразные сервисы для извлечения данных из ресурсов с различной информацией. Этого не всегда достаточно для многоаспектного анализа информации, что требует в некоторых случаях итеративного анализа результатов запросов. Предполагается разработка новых методов и средств решения задач над множественными распределенными коллекциями данных, а именно:

- поддержка разноуровневой актуализации ресурсов – от добавления новых источников информации (масштабирование информационной системы) до коррекции значений (качество данных) и правил классификации объектов;
- средства для повторного использования результатов запросов, возможно, в виде компилируемых каталогов, добавляемых в информационную систему;
- разработка методов отображения и связывания параметров с реальным объектом исследований, поскольку организация многопараметрической информации в базах данных ориентирована на структуру источников данных, а анализ данных ориентирован на реальные объекты;
- приведение разномодельных спецификаций ресурсов к общему языку (унифицированной модели);

- разработка и адаптация новых алгоритмических и программных интерактивных средств наглядной, образной визуализации массивов чисел, содержащихся в многомерных каталогах и базах астрономических данных;
- создание экспертных систем с обновляемой базой данных критериев классификации.

Анализ многомерных распределённых баз гетерогенных данных предполагает релевантный доступ к разнородным массивам данных, которые получены из различных источников и хранятся в разных формах под различными СУБД. При разработке и использовании программных комплексов для анализа такой информации необходимо создание программных интерфейсов, обеспечивающих как быстрый доступ к большим массивам данных, так и препарирующих их в приемлемые для систем анализа форматы. Распространение этих методов на многомерный случай представляет значительные трудности, в особенности при больших объёмах многомерных данных.

Большие системы порождают Большие данные – Большие данные дают возможность познавать Большие системы.

II. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

В настоящее время современная прикладная и фундаментальная наука приносит всё большие объёмы экспериментальных данных. Объём информации о человеческом геноме – 3ТБ, полный цифровой обзор неба – порядка 10ТБ. Очевидно, что даже простой обзор такого объёма данных превышает возможности человека, а эффективное использование процедур автоматического анализа всего объёма данных требует предварительного знания закономерностей для построения алгоритмов выбора и анализа.

Одним из новых перспективных направлений развития информационных технологий, которое способно разрешить указанное противоречие и предоставить эффективные средства и методы работы с большими объёмами информации является когнитивная визуализация данных. Феномен когнитивной машинной графики, впервые научно представленный А.А. Зенкиным [2], состоит в генерации на экране дисплея особых графических изображений, создающих в мозгу человека-оператора зрелищные образы. Когнитивная графика – это совокупность приёмов и методов образного представления условий задачи, которое позволяет либо сразу увидеть решение, либо получить подсказку для его нахождения (за счёт стимуляции интуитивного мышления). Например, объекты с числом параметров два могут быть отображены на обычном двумерном графике в виде точек (величина одного параметра откладывается по оси абсцисс, а другого – по оси ординат), но если речь идёт о десяти параметрах, то такое отображение выполнить нельзя. Объект с десятью параметрами представим точкой в десятимерном пространстве, недоступном для прямого восприятия. Однако такой десятимерный объект можно спроектировать на одну из двумерных плоскостей десятимерного пространства и отобразить графически. Если при этом выбор плоскости сделан

обоснованно и удачно, то группировка точек на плоскости может подсказать какие части банка данных (какие именно объекты) следует подвергнуть дальнейшей детальной обработке.

Состояние современной прикладной информатики определяется во многом уровнем качества машинной графики для систем поддержки интеллектуальных решений и средств мониторинга и контроля. Прежде всего, машинная графика должна обеспечивать повышение таких важнейших показателей прикладных информационных систем как надёжность и достоверность результатов работы решающих процедур контроля и достоверность, поступающих данных.

Для преодоления априорной неопределённости в прикладной информатике разрабатывается целый спектр технических, алгоритмических, программных и методических средств. Это, прежде всего робастные и непараметрические методы статистического анализа, контроля и проверки репрезентативности и однородности данных. Распространение этих методов на многомерный случай представляет значительные трудности, в особенности при больших объёмах многомерных данных. Поэтому для преодоления априорных трудностей целесообразно привлечение возможностей человеческой интуиции (имеется в виду, прежде всего профессиональный опыт, эмпирические знания, на которых основывается профессиональная интуиция), которая позволяет проверять качество работы решающих процедур и устанавливать достоверность используемых данных, что позволяет, например, решать конкретные задачи анализа и контроля.

Создание таких алгоритмов (информативно и устойчиво работающих в условиях априорной неопределённости) потребовало привлечения соответствующих математических идей робастности. Ключевым здесь оказалось привлечение ранговых и порядковых статистик для масштабирования и нормализации многомерных данных. Далее система динамического проецирования «визуализирует» данные в виде облаков точек в многомерном пространстве как псевдотрёхмерный образ (когнитивный образ). Исследователь рассматривает эти облака точек и, распознав, выделяет интересующие его структуры и соответствующим образом их раскрашивает. Для более детального визуального изучения геометрии и структуры этих облаков в программной системе есть возможности их вращения вокруг осей, занимающих различные положения. В результате, объективно обнаруженные кластерные структуры выделяются в подмножества данных (группы) для дальнейшего анализа.

Методы когнитивной визуализации многомерных данных могут быть распространены как на данные, отягощённые или искажённые ошибками, так и на данные разного происхождения и природы. Это достигается использованием робастных и непараметрических процедур способных сохранять работоспособность в таких условиях глубокой априорной неопределённости. Алгоритмы такого типа способны объективно отражать те аналитические свойства многомерных данных, которые затем выявляются традиционными методами многомер-

ного анализа. При этом уловить новые неожиданные статистические связи и кластеры в многомерных данных удаётся именно человеку-исследователю, вооружённому данным алгоритмом. Ибо, здесь удаётся подключить, тот ресурс интуиции и неформального опыта, который свойственен именно человеку исследователю.

Можно сформулировать три основных задачи когнитивной компьютерной графики:

- создание таких моделей представления знаний, в которых была бы возможность однообразными средствами представлять как объекты, характерные для логического мышления, так и образы-картины, с которыми оперирует образное мышление,
- визуализация тех человеческих знаний, для которых пока невозможно подобрать аналитические или текстовые описания,
- поиск путей перехода от наблюдаемых образов-картин к формулировке некоторой гипотезы о тех механизмах и процессах, которые скрыты за динамикой наблюдаемых картин.

Предлагаемая технология позволяет осуществлять двумерную динамическую проекцию многомерных данных на произвольно заданную оператором-исследователем плоскость в многомерном конфигурационном (фазовом) пространстве. Подбор наилучшего положения плоскости проекции осуществляется сам пользователь, опираясь на свою интуицию и когнитивный 3D образ перед глазами. Имея возможность активно влиять на ориентацию плоскости проекции в многомерном пространстве, исследователь свободен от предварительных соображений о статистической (геометрической) структуре данных, которые представляют объекты. Человек непосредственно видит на экране проекции кластеров или многомерных поверхностей, в которые формируются его данные. И этот зрелищный образ стимулирует его интуитивное понимание исследуемых объектов. Особенно это важно при анализе статистических связей, факторном анализе и при распознавании образов. Тот факт, что процедура динамической визуализации не опирается на априорные сведения о природе объектов, а значит и не привносит в проекции искажающих влияний той или иной модели, даёт возможность использовать визуализированные образы в условиях глубокой априорной неопределенности.

Технология основана на разработанных авторами и рядом исследовательских групп алгоритмических, программных и методологических средств наглядной, об разной визуализации массивов данных содержащихся в многомерных каталогах и базах данных. В рамках проведённых исследований получены актуальные результаты в смежных областях гносеологии и социологии науки. Созданными средствами визуализации генерируются визуальные псевдотрёхмерные графические образы, отражающие качественные и количественные особенности данных содержащихся в базах данных. Графический образ легко и однозначно воспринимается любым пользователем как яркое, легко запоминающееся изображение

ние уникального графического объекта, который однозначно связан со структурами данных. Изменение в структуре данных приводит к радикальному изменению формы графического объекта.

Более конкретная постановка задачи формируется как задача разработки нового поколения программных диалоговых графических средств генерации когнитивных образов и методологии работы с этими когнитивными образами многомерных данных, отражающих состояние сложных динамических систем в условиях априорной неопределенности.

III. Основные результаты

Предлагаемый подход и созданные на его основе алгоритмы и программные системы [3–10] позволяют осуществлять двумерную проекцию многомерных данных на произвольно заданную оператором-исследователем плоскость в многомерном конфигурационном (фазовом) пространстве. А подбор наилучшего положения плоскости проекции осуществляет сам пользователь, опираясь на свою интуицию и когнитивный образ перед глазами. Имея возможность активно влиять на ориентацию плоскости проекции в многомерном пространстве, исследователь свободен от предварительных соображений о статистической или геометрической структуре данных, которые представляют объекты, как экологического, социального так и астрофизического мониторинга. Человек непосредственно видит на экране проекции кластеров или многомерных поверхностей, в которые формируются его данные. Этот зрелищный образ стимулирует его интуитивное понимание исследуемых объектов.

Такое динамическое «виденье» позволяет ему самому выбрать ориентацию плоскости, чтобы иметь наилучшую (в интуитивном смысле) проекцию для дальнейшей, объективной статистической обработки. Особенно это важно при анализе статистических связей, факторном анализе и распознавании образов. Тот факт, что процедура динамической визуализации не опирается на априорные сведения о природе объектов, а значит и не привносит в проекции искажающих влияний той или иной модели, даёт возможность использовать визуализированные образы в условиях глубокой априорной неопределенности.

Это достигается использованием робастных и непараметрических процедур способных сохранять работоспособность в таких условиях глубокой априорной неопределенности. Алгоритмы такого типа способны объективно отражать те аналитические свойства многомерных данных, которые затем выявляются традиционными методами многомерного анализа. При этом уловить новые неожиданные статистические связи и кластеры в многомерных данных удаётся именно человеку-оператору, вооружённому данным алгоритмом. Ибо, здесь удаётся подключить, тот ресурс интуиции и неформального опыта, который свойственен именно человеку исследователю.

Предложенные алгоритмы в общем случае свободны от предварительных соображений о статистической или геометрической структуре данных, представляющих

предметную область исследования. Полученные выходные данные могут быть преобразованы к форматам программы или устройства визуализации (например, дисплея монитора), а так же направлены на дальнейшую обработку, при этом связь с исходными многомерными данными сохраняется.

Разработка программных комплексов когнитивной машинной графики выполнена на основе концепции и методологии образной визуализации больших массивов данных содержащихся в многомерных каталогах и базах данных [10–14]. В развитии и апробировании новых алгоритмических средств машинной графики использовали ускорение вычислений с использованием новых параллельных архитектур современных многопроцессорных систем, сетевого облачного доступа к обработке данных и создания удобного и эффективного пользовательского интерфейса.

Проведены исследования и разработка методов 3D кластеризации 6D когнитивных образов Big Data. Предложены новые подходы к кластеризации когнитивных образов и новая методика динамического выделения кластеров для системы когнитивной визуализации SH, устраняющая некоторые недостатки и реализующая предложенные подходы к кластеризации когнитивных образов [11, 15]. Продолжено развитие системы Space Hedgehog (SH) – программного комплекса когнитивной машинной графики на основе концепции и методологии образной визуализации больших массивов данных содержащихся в многомерных каталогах и базах данных, что включает расширение функциональности в контексте концепта 6D-визуализации. SH версия 4.0 дополнена кластеризацией и выборкой по ориентации ортов hedgehog- поля с удобной системой управления и визуализацией.

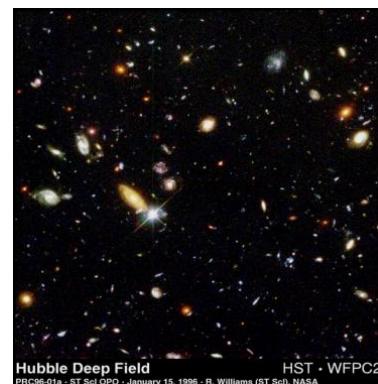
IV. СРАВНЕНИЕ С АНАЛОГАМИ

Декларируемая адекватность любого математического описания предметной области – это не абсолютная истина, а только принятное соглашение о способе отождествления модели и реального мира. Любой статистический метод будет хорош настолько, насколько качественными являются входные данные для обучения модели (принцип: *garbage in – garbage out!*). Основные затраты на подготовку обучающей выборки (фильтрация, трансформация, удаление пропущенных значений и т.д.) и понимание моделируемого процесса. Для любого алгоритма следует определить две группы метрик, для оценки качества их работы:

- **Внутренние метрики** качества, показывающие насколько хорошо алгоритм справился с поставленной перед ним задачей (классификация, кластеризация, ранжированная выдача, генерация и многое другое).
- **Внешние метрики** качества, показывающие то, насколько алгоритм хорошо встраиваться в общую систему, составной частью которой он является (скорость работы, потребляемая память, сохранность данных и другие).

Для сравнительного анализа метрик были выбраны следующие методы предварительного анализа данных:

- **Факторный анализ** (метод главных компонентов) – замена коррелированных компонентов некоррелированными факторами с возможностью ограничиться наиболее информативными главными компонентами.
- **Деревья классификации** – это способ представления данных с обучающей выборкой в иерархической, последовательной структуре, где каждому объекту соответствует единственный узел, дающий решение.
- **Метод ближайших соседей** – метрический алгоритм для автоматической классификации объектов с предварительным определением метрики.
- **Метод стохастического вложения соседей с распределением Стьюдента** (t-SNE) – итерационное построение точек на гиперплоскости с сохранением исходной структуры расположения соседей.
- **Метод когнитивной динамической визуализации** – построение динамических проекций многомерного пространства параметров для генерации n-мерных когнитивных образов предметной области, отражающих её статистические и топологические свойства.



Rис. 1. Глубокий обзор HST

Для тестирования и использовались данные HUDF (Hubble Ultra Deep Field) выборка 4125 галактик до 30-й звёздной величины с 49 параметрами (рис. 1) и программные системы:

- **IBM SPSS Statistics** – интегрированный комплекс продуктов (<https://www.ibm.com/ru/ru/analytics/spss-trials>), охватывающий весь процесс анализа, от планирования до сбора данных, анализа, составления отчетов и развертывания.
- **MATLAB** (Statistics and Machine Learning Toolbox) – это среда и язык расчетов, предназначенный для решения широкого спектра инженерных и научных задач любой сложности в любых отраслях.

- **Система R** – достаточно полная, надёжная и динамично развивающаяся статистическая среда, объединяющая язык программирования высокого уровня и мощные библиотеки программных модулей для вычислительной и графической обработки данных. Статистическая среда R (<http://www.r-project.org>) вместе с "CRAN" («Comprehensive R Archive Network» <http://cran.r-project.org>) является лидером среди некоммерческих систем статистического анализа.
- **SW/SH** на основе развитой концепции когнитивной графики для визуализации и анализа многомерных данных, которая позволяет стимулировать и привлекать в интерактивном режиме интуицию исследователя, представляя данные произвольного объёма и размерности в виде динамических 3D образов. С помощью системы SH (SpaceHedgehog) возможен одновременный контроль и анализ 6D когнитивных образов многопараметрических баз данных произвольного объёма.

Наиболее успешный из статических методов анализ методом главных компонент позволил уверенно разделить объекты на 5 классов. Интерактивный анализ методом когнитивной динамической визуализации уверенно показал возможное разделение на 9 классов.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается этап предварительной обработки данных с помощью визуального анализа на примере опубликованных и оценивается применимость методов сокращения размерности для задач классификации. Обсуждается применимость и эффективность использования указанных методик для анализа, интерпретации и получения новых знаний из распределённых коллекций гетерогенных Big Data произвольных и смешанных форматов. Особо отмечена направленность интерактивного анализа и мониторинга на автоматизацию, а не на автоматичность, т.е. не искусственный интеллект, а человеко-машинная система. Предложены оригинальные методы и технологии построения и анализа многомерных гетерогенных данных, методы и алгоритмы визуального анализа для решения широкого класса сложных задач (SW и SH).

Авторами проведён сравнительный анализ наиболее распространённых методов и технологий исследования Big Data, включая классический многомерный статистический анализ, метод главных компонент (PCA, principal component analysis), метод стохастического вложения соседей с распределением Стьюдента (stochastic neighbor embedding, t-SNE). Анализ выполнен на нескольких коллекциях астрономических данных.

Разработанная технология и методика когнитивно-визуального анализа больших объемов гетерогенных и отягощённых ошибками данных, протестированная на данных различной природы показала свою применимость и перспективность не только для постериорного анализа данных, но и для задач оперативного контроля и управления сложными системами. Инсталлированные на высокопроизводительных графических станциях системы SpaceWalker (SW) и SpaceHedgehog (SH) могут

быть использованы в режиме on-line для эффективного интегрального мониторинга состояния сложных технических систем и технологических процессов. Весьма перспективной представляется разработка методологии и методик, обеспечивающих их применение для анализа большого объёма экспериментальных данных при мониторинге экологических, технических, социальных, экономических и политических систем, а также для систем принятия решений и управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lynch C.* Big data: how do your data grow? // Nature. – 2008. – Vol. 455, No. 7209. – P. 28-29.
2. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика. – М.: Наука, 1991.
3. Горохов В.Л., Витковский В.В., Иванов Л.Н. Робастно-когнитивная технология динамической визуализации многомерных наблюдательных данных // Препринт САО РАН N93. – Нижний Архыз, 1992.
4. *Allen R.B.* Cognitive Factors in Human Interaction with computers // Behavior and Information Technology. – 1989. – Vol. 1, No. 3. – P. 257-278.
5. *Allport D.A.* Patterns and Actions: Cognitive Mechanisms are Content-Specific, in Guy Claxton (ed) // Cognitive Psychology: New Directions, Routledge and Kegan Paul, 1980.
6. *Gorohov V.L., Vitkovskij V.V. Ivanov L.N.* Cognitive informational technology of planning and control of ecological monitoring with further robust analysis of extreme manifestations // Proceedings First Eurasian symposium on space science and technologies Gebze, Turkey, Octob, 25-27, 1993.
7. *Gorochov V.L., Vitkovskij V.V.* Algorithmic methods and software for non-parametric estimation of distribution of non-uniform observational data // Turkish Journal of Physics. – 1994. – Vol. 18, No. 9. – P. 1017-1020. Published by the Scientific and Technical Research Council Turkey.
8. Горохов В.Л., Витковский В.В., Потерпеев О.Ю., Вдовенко И.В., Гозина Я.Л., Никишина И.А. Методика динамической визуализации для идентификации удаленных баз многомерных данных в астрономии и экологии // Труды Международной конференции по мягким вычислениям 25-27 июня 2003 (SCM – 2003). – Санкт-Петербург 2003.
9. Vitkovskiy V., Gorohov V. 6D visualization of multidimensional data by means of cognitive technology Astronomical Data Analysis Software and Systems XIX. ASP Conference Series, Vol. 434, 2010
10. *Vladimir Vitkovskiy, Gorohov Vladimir, Komarinskij Sergej, Velichko Aleksej, Zhelenkova Olga.* The Research and Development of Cognitive Vizualization Thechnology for the Large Volume of Experimental Data // Target Conference "BIG DATA Across Disciplines: in Search of Symbiosis, Groningen, Netherlands, 3-5 November, 2014. – P. 12.
11. Горохов В.Л., Витковский В.В., Холодняк Д.В. Практика анализа научных метафор на основе когнитивных образов многомерных данных // Международная конференция по мягким вычислениям, (SCM – 2017). – Изд-во СПбГЭТУ, 2018. – Т. 2. – С. 427-429.
12. Витковский В.В. Информатика в САО // Юбилейный сборник. Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук. 50 лет. – Нижний Архыз, 2018. – С. 98-123.
13. Горохов В.Л., Бузников А.А., Котченко К.Ф., Витковский В.В. Когнитивный мониторинг результатов лечения инсультов ик-излучением, модулированного в терагерцевом диапазоне // Материалы международной конференции «Региональная информатика» «РИ-2018» Санкт Петербург, 24-26 октября 2018 года. СПОИСУ-СПБ 2018. – 442 с.
14. Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А., Малькова Г.А., Шергин В.С., Черненков В.Н. Общий архив наблюдений // Юбилейный сборник. Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук. 50 лет. – Нижний Архыз, 2018. – С. 122-128.
15. Zhelenkova O.P., Vitkovskij V.V., Plyaskina T.A., Shergin V.S., Chernenkov V.N. Long-term data management in the SAO RAS archive system. ASP Conference Series, Vol. 521, Edited by Marco Molinaro, Keith Shortridge, and Fabio Pasian. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2019. – P. 128-131.

Управление формированием и поддержанием строя автономных беспилотных летательных аппаратов

Веселов Геннадий Евгеньевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
gev@sedu.ru

Лебедев Борис Константинович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
lebedev.b.k@gmail.com

Лебедев Олег Борисович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
lebedev.ob@mail.ru

Аннотация. В работе решается задача управления коллективом роботов, обеспечивающая движение группы агентов с соблюдением определённой геометрической структуры строя (определенных взаимных расстояний относительно друг друга), при условиях полной автономности агента и возможности получения информации только от своих ближайших соседей. Общая идея работы заключается в разработке методов построения интеллектуальных систем планирования перемещения мобильного робота в неизвестной среде. Построение таких интеллектуальных систем осуществляется на базе применения аппарата мультиагентов, нечеткой логики и искусственных нейронных сетей, обеспечивающих выполнение им планируемой и уточняемой непосредственно в процессе движения безопасной траектории в окружающей среде с неизвестными препятствиями.

Annotation. The work solves the problem of managing a team of robots, which ensures the movement of a group of agents in compliance with a certain geometric structure of the formation (certain mutual distances relative to each other), under conditions of complete autonomy of the agent and the possibility of obtaining information only from its nearest neighbors. The general idea of the work is to develop methods for constructing intelligent systems for planning the movement of a mobile robot in an unknown environment. The construction of such intelligent systems is carried out on the basis of the use of a multi-agent apparatus, fuzzy logic and artificial neural networks, which ensure the implementation of a safe trajectory planned and refined directly in the process of movement in an environment with unknown obstacles.

Ключевые слова: децентрализованное управление, беспилотный летательный аппарат, коллектив роботов, строй, коллективная адаптация.

Keywords: decentralized control, unmanned aerial vehicle, collective of robots, system, collective adaptation.

I. ВВЕДЕНИЕ

Перспективное направление в области использования беспилотных летательных аппаратов – это их объединение в группы или в рой. Принцип организации роя моделирует поведение различных насекомых, обладающих «коллективным интеллектом», например, рой пчел, муравьиная колония и т.д. [1, 2]. В случае с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), после их объединения в рой, каждый

БПЛА управляет собственной автоматикой, а поведением роя может управлять программа с элементами искусственного интеллекта или оператор [1, 2].

В связи с этим, основной целью при объединении БПЛА в рой, является повышение эффективности управления формированием и поддержанием строя автономных беспилотных летательных аппаратов. Достижение поставленной цели возможно за счет разработки методов и алгоритмов децентрализованного управления, учитывающих нелинейный характер структуры систем «автопилот-аппарат» [1, 2].

В данной работе представлено децентрализованное правило управления группой агентов, моделирующих мобильных роботов, которое обеспечивает движение группы агентов с соблюдением определённой геометрической структуры строя (определенных взаимных расстояний относительно друг друга), при условиях полной автономности агента и возможности получения информации только от своих ближайших соседей. Децентрализованное управление это способ, при котором основной объем вычислений производится не в наземном центре управления и планирования операций, а на борту беспилотных машин [3,4]. Данный способ включает в себя три варианта управления группой воздушных роботов: коллективная, стаяная и роевая стратегии управления. Строем будем называть требуемое расположение роботов на плоскости или в пространстве. В зависимости от того, каким образом задан целевой строй, строевая задача может иметь различную постановку [5, 6].

Для равномерного распределения агентов в зоне выполнения миссии, поддержания устойчивой связи внутри группы и исключения столкновений роботы должны при движении соблюдать некоторую геометрическую структуру (определенное расположение относительно друг друга внутри строя или относительно центра масс группы, образующее определенную геометрическую фигуру) [7–9].

Управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации. Для реализации механизма адаптации параметрам вектора сопоставляются автоматы адаптации, моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Разработана

структура процесса альтернативной коллективной адаптации, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов в строю [7–9].

В работе решаются задачи управления коллективом роботов, обеспечивающее движение коллектива роботов в колонне и развернутых в линию.

II. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ РОБОТОВ В СТРОЮ ТИПА «КОНВОЙ»

В первой постановке рассматривается колонна – строй, в котором роботы расположены последовательно друг за другом на заданной дистанции. Роботы пронумерованы от R_0 – ведущего робота до R_n – замыкающего колонну. Этот тип движения требует, чтобы каждый робот R_i ($i=1,2,\dots,n$), кроме первого ведущего, двигался по траектории, вдоль которой движется робот R_{i-1} , с некоторым временным запаздыванием T . Ведущий робот R_0 может быть оснащен сенсорной системой, позволяющей ему планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, в то время как остальные роботы должны просто повторять траекторию своего ближайшего соседа. Рассматриваются системы, в которых агенты перемещаются в обычном евклидовом пространстве с дискретным временем [7, 10, 11].

Задаются исходные параметры строя. Известен вектор $\mathbf{V}_i = (x_b, y_b, \varphi_b, V_i)$ состояния каждого из роботов R_i в абсолютной системе координат. В скобках – $(x_b, y_b, \varphi_b, V_i)$ положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно.

S_0 – фиксированная дистанция (расстояние) между любой парой соседних в колонне роботов R_i и R_{i+1} в абсолютной системе координат.

$\omega_{i,i-1} = \varphi_i - \varphi_{i-1}$ – угол между осями $0_i X_i$ и $0_{i-1} X_{i-1}$ связных систем координат соседних роботов R_i и R_{i+1} .

$V_i(t)$ – линейная скорость передвижения робота R_i в момент времени t .

Если известен вектор $\mathbf{V}_i = (x_b, y_b, \varphi_b, V_i)$ состояния каждого из роботов в абсолютной системе координат, то для вычисления скорости робота R_i достаточно знать длину проекции вектора робота R_i в абсолютной системе координат на ось связанной системы координат X_i . Рассмотрим теперь задачу управления ведомыми роботами. Главная идея состоит в том, что целью управления ведомыми роботами является выполнение равенств:

$$\begin{aligned}\omega_{i,i-1}(t+1) &= 0; \\ V_i(t+1) \cos \omega_{i,i-1}(t-1) &= V_{i-1}(t); \\ S_i &= S_0.\end{aligned}$$

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производится перепланирование параметров движения роботов, следующих за роботом R_{i+1} . Ошибкой робота R_i является: $\delta S_i = S_i(t) - S_0$, $\omega_{i,i-1}(t) > 0$, δx_i , δy_i . Задача состоит в том, чтобы робот R_i точно следовал за роботом R_{i-1} .

Стратегия 1 для каждого робота R_i ($i > 0$) заключается в коррекции движения по текущему отклонению от заданной траектории следования псевдоцели (робота R_{i-1}). При этом должны быть пройдены все точки с минимальным отклонением.

Стратегия 2 (сближение с псевдоцелью) осуществляется «параллельное сближение» робота R_i с траекторией следования псевдоцели с соблюдением заданного расстояния между парой соседних в колонне роботов R_{i+1} и R_i и предполагает вычисление углов рыскания для прогнозирования их места встречи. Точное прохождение робота через опорные точки не требуется.

Кинематическая модель каждого из роботов имеет вид:

$$\omega_{i,i-1}(t+1) = \omega_{i,i-1}(t) + \delta_\omega \omega_{i,i-1}(t); \quad (1)$$

$$V_i(t+1) \cos \omega_{i,i-1}(t+1) = V_{i-1}(t+1) + \delta_V V_{i-1}(t+1); \quad (2)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \delta_x x_i(t); \quad (3)$$

$$y_i(t+1) = y_i(t) + \delta_y y_i(t); \quad (4)$$

Программная траектория каждого ведомого робота формируется следующим образом. Закон управления, ограничивается рассмотрением кинематической модели. Здесь не учитываются инерционные и конструктивные параметры робота. Максимальные значения скорости $V_i(t+1)$ и угла рыскания $\omega_{i,i-1}(t+1)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах. Приведем применяемые продукционные правила в порядке приоритета их исполнения.

Правило 1 (устранение расхождения курса робота R_{i+1}) Если $\omega_{i,i-1}(t) > 0$, то выполняется коррекция угла между осями координат $0_i X_i$ и $0_{i-1} X_{i-1}$ с целью его уменьшения, в соответствии с выражением (1).

Правило 2. Если отклонение и время отработки отклонения не превышает наперед заданных пороговых значений, то выполняется коррекция скорости $V_i(t+1)$ движения по текущему отклонению от заданной траектории следования псевдоцели, в соответствии с выражениями (2, 3, 4).

Первое правило предназначено для решения задачи управления при условии оказания управляющего воздействия на направление перемещения агента, а второе правило – при условии оказания управляющего воздействия на скорость агента. Для каждого правила управления представлен его дискретный аналог. Линейная скорость $V_{i-1}(t)$, угол $\omega_{i,i-1}(t)$ и координаты x_i, y_i место расположения преследуемого робота R_{i-1} являются возмущениями неопределенного характера, а для догоняющего робота R_i – в качестве параметров управления передвижением робота.

A. Передвижение группы роботов в строю типа «конвой» на основе коллективной адаптации

Управление движением группы роботов в строю типа «конвой» осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации [7, 9–12].

Объектами адаптации догоняющего робота R_i являются рассматриваемые в качестве управлений параметры вектора $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \phi_i, V_i)$ – положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно. Коллектив объектов адаптации (их совокупность) группы роботов в строю типа «конвой» соответствует объекту оптимизации (ОО).

Для реализации механизма адаптации параметрам вектора $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \phi_i, V_i)$ сопоставляются автоматы адаптации АА $-a_{i-1}^{\omega}, a_{i-1}^{\alpha}, a_{i-1}^V$, моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Автомат адаптации имеет две группы состояний: $C_1 = \{c_{1i}|i=1,2,\dots,g\}$ и $C_2 = \{c_{2i}|i=1,2,\dots,g\}$, соответствующие двум альтернативам A_1 и A_2 поведения объекта адаптации в среде: A_1 – изменить размер параметра, A_2 – оставить без изменения. Таким образом выходной алфавит автомата адаптации $A = \{A_1, A_2\}$. Число состояний в группе задается параметром g , называемым глубиной памяти. Выходной алфавит $Q = \{+, -\}$ включает возможные отклики среды: «поощрение» и «наказание» [12].

На вход автомата адаптации подается сигнал «поощрение» или «наказание» в зависимости от состояния объекта адаптации (параметра вектора \mathbf{V}_i) в среде. Рассмотрим принципы функционирования одного АА. Первоначально АА находится в одном из начальных состояний. Введем обозначение оценок (значений) параметров робота R_i : $\rho_i^a(t)$ для $\omega_{i-1}(t)$, $\rho_i^V(t)$ для $V_{i-1}(t)$, $\rho_i^x(t)$ для $x_i(t)$, $\rho_i^y(t)$ для $y_i(t)$.

Локальная цель объекта адаптации – достижение такого состояния, при котором его оценка $\rho_i = 0$. Глобальная цель коллектива объектов адаптации заключается в достижении такого состояния S , при котором $F(S) \rightarrow \min$.

Процесс альтернативной коллективной адаптации, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов в строю типа «конвой», на каждом шаге t осуществляется за четыре такта [8, 12].

На первом такте коллективной адаптации для каждого R_i рассчитываются значения параметров вектора \mathbf{V}_i .

На втором такте для каждого автомата адаптации a_i^* вырабатывается отклики среды: «поощрение» или «наказание».

1. Для каждого АА, управляющего изменениям угла $\omega_{i-1}(t)$:

Если $sgn(\omega_{i-1}(t)) = 0$, то для АА $a_{i-1}^{\omega}(t+1)$, вырабатывается сигнал «поощрение».

Если $sgn(\omega_{i-1}(t)) \neq 0$, то для АА $a_{i-1}^{\omega}(t+1)$ вырабатывается сигнал «наказание».

2. Для каждого АА, управляющего изменениями x_i, y_i :

Если $sgn(S_i(t+1) - S_0) = 0$, то для АА $a_{i-1}^y(t+1)$, вырабатывается сигнал «поощрение».

Если $sgn(S_i(t+1) - S_0) \neq 0$, то для АА $a_{i-1}^y(t+1)$ вырабатывается сигнал «наказание».

3. Для каждого АА, управляющего изменениями V_i :

Если $sgn(V_i(t) - V_{i-1}(t)) = 0$, то для АА $a_{i-1}^V(t+1)$, вырабатывается сигнал «поощрение».

Если $sgn(V_i(t) - V_{i-1}(t)) \neq 0$, то для АА $a_{i-1}^V(t+1)$, вырабатывается сигнал «наказание».

На третьем такте в каждом автомате адаптации a_i под действием подаваемого на его вход отклика q_i осуществляется переход в новое состояние.

На четвертом такте для каждого объекта адаптации реализуется альтернатива в соответствии с выходами АА.

1. Если АА $a_{i-1}^{\omega}(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^1 ij$, то $\omega_{i-1}(t)$ не изменяется.

Если АА $a_{i-1}^{\omega}(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^2 ij$, то $|\omega_{i-1}(t+1)| = |\omega_{i-1}(t)| - \delta_{\omega} |\omega_{i-1}(t)|$.

2. Если АА $a_{i-1}^y(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^1 ij$, то $x_i(t+1) = x_i(t)$, $y_i(t+1) = y_i(t)$.

Если АА $a_{i-1}^y(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^2 ij$, то:

Если $S_i(t) > S_0$, то $x_i(t+1) = x_i(t) - \delta_x \cdot \cos \varphi_i(t+1)$, $y_i(t+1) = y_i(t) - \delta_y \cdot \sin \varphi_i(t+1)$,

Если $S_i(t) < S_0$, то $x_i(t+1) = x_i(t) + \delta_x \cdot \cos \varphi_i(t+1)$, $y_i(t+1) = y_i(t) + \delta_y \cdot \sin \varphi_i(t+1)$.

3. Если АА $a_{i-1}^V(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^1 ij$, то $V_i(t+1) = V_i(t)$.

Если $V_i(t) > V_{i-1}(t)$, то $V_i(t+1) = V_i(t) - \delta_V \cdot \cos \varphi_i(t+1)$, $y_i(t+1) = y_i(t) - \delta_y \cdot \sin \varphi_i(t+1)$,

Если $V_i(t) < V_{i-1}(t)$, то $x_i(t+1) = x_i(t) + \delta_x \cdot \cos \varphi_i(t+1)$, $y_i(t+1) = y_i(t) + \delta_y \cdot \sin \varphi_i(t+1)$.

III. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ РОБОТОВ РАЗВЕРНУТЫХ В ЛИНИЮ

При совместном движении двух и более робототехнических комплексов (РТК) важно знать их взаимное расположение с высокой точностью [9–11]. Каждому из роботов необходим набор датчиков, позволяющих ему получать информацию об окружающей среде. Поэтому, для полноценной работы мобильного РТК роботы оснащены радиочастотными датчиками определения взаимного местоположения. В состав каждого интеллектуального агента (мобильного робота), входит решающее устройство, получающее данные от других устройств по беспроводным каналам. Производя их обработку, устройство формирует команды автопилоту. Обрабатывая считанную сенсорами информацию, система управления движением решает задачу построения пути перемещения [9–11].

Роботы, развернутые в линию, пронумерованы от R_0 – ведущего робота до R_n – замыкающего линейку роботов. Этот тип движения требует, чтобы каждый робот R_i ($i=1,2,\dots,n$), кроме первого (ведущего), двигался по траектории, параллельно той по которой движется робот R_{i-1} , с одинаковой скоростью $V_i = V_0$ с соблюдением постоянного расстояния D между каждой парой соседних роботов R_i и R_{i-1} , при этом робот R_i выравнивает траекторию по траектории робота R_{i-1} .

Ведущий робот R_0 может быть оснащен сенсорной системой, позволяющей ему планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, в то время как остальные роботы должны просто повторять траекторию своего ближайшего соседа [7].

Известен вектор $W_i = (x_i, y_i, \alpha_i, h_i, V_i)$ состояния каждого из роботов в абсолютной системе координат, где (x_i, y_i) – координаты места расположения робота, V_i – скорость передвижения робота, α_i – угол между вектором V_i и базовой линией Line, h_i – модуль вектора V_i . Заданы α_0 – для ведущего робота и D – расстояние в линии между соседними роботами R_i и R_{i-1} .

Рассмотрим теперь задачу управления ведомыми роботами. Главная идея состоит в том, что целью управления ведомыми роботами является выполнение (достижение R_i с курсом робота R_{i-1}) равенств:

1. $V_{i-1}(t) = V_i(t)$.
2. $h_{i-1}(t) = h_i(t)$.
3. $x_i(t) - x_{i-1}(t) = D$.
4. $y_i(t) = y_{i-1}(t)$.
5. $\alpha_i(t) = \alpha_{i-1}(t) = \alpha_0$.

$\varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ – угол между $V_{i-1}(t)$ и $V_i(t)$.

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производится перепланирование параметров движения каждого робота R_i , движущегося параллельно с соседним роботом R_{i-1} . Ошибкой робота R_i является:

$$\delta_i = k_1(|D - |(x_i(t) - x_{i-1}(t))| + k_2(|y_i(t) - y_{i-1}(t)| + k_3(|h_i(t) - h_{i-1}(t)|) + k_4(|\alpha_i(t) - \alpha_0|)).$$

Ошибка перемещения роботов: $\Delta = \sum_i \delta_i$.

Максимальные значения отклонения скорости $\delta V = (V_i(t+1) - V_i(t))$ – и угла «крыскания» $\varphi_{i,i-1}(t+1)$ $\varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Правило 1. (Устранение расхождения курса робота R_i с курсом робота R_{i-1}). Если $\varphi_i(t) > 0$, то выполняется коррекция угла $\alpha_i(t)$ между V_i и базовой линией Line с целью уменьшения $\varphi_i(t)$, в соответствии с выражением (5). Цель коррекции – минимизация величины $\varphi_i(t)$.

Правило 2. Если существует отклонение $\varepsilon_h = h_i(t) - h_{i-1}(t)$ и время отработки отклонения не превышает наперед заданных пороговых значений, то выполняется коррекция скорости $h_i(t)$ движения по текущему отклонению от заданной траектории следования псевдоцели, в соответствии с выражениями $h_i(t+1) = h_i(t) + \zeta_v$. Цель коррекции – минимизация величины ζ_v .

Правило 3. Если $y_i(t) - y_{i-1}(t) = \varepsilon_y$ и $|\varepsilon_y| > 0$, то выполняется коррекция $y_i(t) = y_i(t) + \zeta_y$. Цель коррекции – минимизация значения $|\varepsilon_y|$.

Правило 4. Если $x_i(t) - x_{i-1}(t) = \varepsilon_x$ и $|\varepsilon_x| > D$, то выполняется коррекция $x_i(t+1) = x_i(t) + \zeta_x$. Цель коррекции – минимизация разности $(|\varepsilon_x| - D)$.

Предложена структура маневра, выполняемого роботом для коррекции отклонений параметров, заключающаяся в следующем. Сначала робот R_i изменяет значение параметра $\alpha_i(t)$ на величину δ_i , затем в течении времени δ_t робот передвигается с новым значением параметра $\alpha^*(t) = \alpha_i(t) + \delta_i$. По истечении времени δ_t возвращается исходное значение параметра, с которым робот продолжает движение.

Первое правило предназначено для решения задачи управления при условии оказания управляющего воздействия на направление перемещения робота, а второе правило – при условии оказания управляющего воздействия на скорость агента. Для каждого правила управления представлен его дискретный аналог.

При рассмотрении пары роботов R_{i-1} и R_i параметры: линейные скорости $V_{i-1}(t), V_i(t)$, углы $\alpha_i(t), \alpha_{i-1}(t), \varphi_i(t)$, координаты (x_i, y_i) и (x_{i-1}, y_{i-1}) , модули $h_i(t), h_{i-1}(t)$ являются входными. При этом $V_{i-1}(t), \alpha_{i-1}(t), (x_{i-1}, y_{i-1}), h_{i-1}(t)$, являются возмущениями неопределенного характера, а параметры робота R_i : $V_i(t), \alpha_i(t), (x_i, y_i)(t), h_i(t)$ используются в качестве параметров управления передвижением робота. На следующем шаге параметры робота R_i приобретают новые значения $V_i(t+1), \alpha_i(t+1), \alpha_i(t), (x_i, y_i)(t+1), h_i(t+1)$.

A. Передвижение группы роботов развернутых в линию на основе коллективной адаптации

Для управления движением группы роботов развернутых в линию разработан адаптивный алгоритм с обратной связью, базирующийся на методе самообучения и самоорганизации [12].

Подход к решению этой задачи состоит в формализации понятия отклонения текущего положения ведомого робота R_i от требуемого положения. Это достигается на основе визуальной информации и поиске такого управления с обратной связью, которое обеспечивает сведение к нулю нормы этого отклонения. Для управления движением робота параллельно траектории ведущего (ведущего) робота R_{i-1} использованы кинематические уравнения в переменных состояния, характеризующих выполнение цели управления. Решена задача локализации роботов с использованием относительного положения.

Управление движением группы роботов, развернутых в линию осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации [9, 12].

Объектами адаптации ведомого робота R_i являются рассматриваемые в качестве управлений параметры вектора W_i – положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно.

Коллектив объектов адаптации (их совокупность) группы роботов развернутых в линию соответствует объекту оптимизации (ОО) [9, 12].

Для реализации механизма адаптации каждому объекту (параметру p_{ij} вектора $W_i = (x_i, y_i, \alpha_i, h_i, V_i)$) сопоставляется автомат адаптации АА, моделирующий поведение объекта адаптации в среде. Процесс работы автомата адаптации, выработка заключений и т.д. представлены выше в разделе II [12].

Локальная цель объекта адаптации – достижение такого состояния, при котором его оценка равна 0.

Глобальная цель коллектива объектов адаптации заключается в достижении такого состояния S (т.е. таких значений параметров роботов) при которых «Ошибка перемещения» роботов $\Delta = \sum_i \delta_i \rightarrow \min$.

Процесс альтернативной коллективной адаптации, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов, развернутых в линию, осуществляется за четыре такта для каждого робота на каждом шаге t . Перепланирование параметров движения роботов R_i , производится в каждый момент времени t [9, 12].

На первом такте коллективной адаптации для каждого R_i рассчитываются значения параметров вектора W_i .

На втором такте для каждого автомата адаптации вырабатывается отклики среды: «поощрение» или «наказание».

Для каждого параметра p_{ij} вектора W_i рассчитывается отклонение $\mu_{ij}(t)$ от его значения в векторе W_{i-1} :

1. Если $sgn(\mu_{ij}(t))=0$, то для соответствующего АА вырабатывается сигнал «поощрение».

2. Если $sgn(\mu_{ij}(t))\neq0$, то для соответствующего АА вырабатывается сигнал «наказание».

На третьем такте в каждом автомате адаптации под действием подаваемого на его вход отклика осуществляется переход в новое состояние.

На четвертом такте для каждого объекта адаптации реализуется альтернатива в соответствии с выходами АА:

1. Если АА находится в одном из состояний группы $C^1 ij$, то значение параметра p_{ij} не изменяется.

2. Если АА находится в одном из состояний группы $C^2 ij$, то значение параметра p_{ij} изменяется на величину пропорциональную отклонению $\mu_{ij}(t)$.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработаны новые математические методы моделирования движения роботов. Рассматривается задача управления движением коллектива роботов в колонну и развернутых в линию. Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производится перепланирование параметров движения каждого робота R_i , движущегося параллельно с соседним роботом R_{i-1} . Управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации. Рассмотрены принципы функционирования одного автомата адаптации. Целью управления ведомыми роботами является минимизация отклонений. Для реализации механизма адаптации параметрам вектора сопоставляются автоматы адаптации, моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Разработана структура процесса альтернативной коллективной адаптации, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов в колонну и развернутых в линию.

Разработаны оригинальные правила управления параметрами, обладающие рядом преимуществ по сравнению с другими методами: полная децентрализация управления в сочетании с динамической коррекцией параметров роботов, задающих положение и ориентацию робота в абсолютной системе координат, и линейную скорость робота соответственно. Предложена структура маневра, выполняемого роботом для коррекции отклонений параметров. Управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации. В его основу положены идеи коллективного поведения объектов адаптации, что позволяет эффективно обрабатывать внештатные ситуации, такие как выход агентов из строя, изменения числа агентов вследствие выхода из строя или внезапного приобретения связи с очередным агентом, а также в условиях наличия ошибок измерений и шумов, удовлетворяющих определенным ограничениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника. Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы. – 2011. – С. 35-51.
2. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 448 с.
3. Калиев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Методы и модели коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит. – 2009. – 280 с.
4. Морозова Н.С. Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – Т. 1. – С. 65-74.
5. Бурдаков С.Ф., Сизов П.А. Алгоритмы управления движением мобильного робота в задаче преследования // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2014. – № 6 (210). – С. 49-58.
6. Зенкевич С.Л., Чжу Х. Управление движением группы роботов в строю типа «конвой» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18 (1). – С. 30-34.
7. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.М. Гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории на плоскости в условиях частичной неопределенности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2018. – № 1. – С. 76-93.
8. 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.
9. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Адаптивное управление передвижением коллектива мобильных роботов развернутых в линию // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник научных трудов X-й Международной научно-технической конференции (ИММВ-2021). – Смоленск: Универсум, 2021. – С. 238-246.
10. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Management of Behavior of a Swarm of Robots Applicable to the Tasks of Monitoring a Some Territory // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 9th Computer Science On-line Conference. Springer, Czech Republic. – 2020. – Vol. 2. – P. 324-332.
11. Кузнецов А.В. Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 2. – С. 130–138.
12. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Поисковая адаптация: Теория и практика. – М.: Физматлит. – 2006. – 272 с.

Синтез динамической модели шума сигналов управления беспилотного летательного аппарата в режиме сопровождения заданного объекта

Шаров Сергей Николаевич

Научно-исследовательская
лаборатория обеспечения
инновационных разработок

АО «Концерн «Гранит-Электрон»
Санкт-Петербург, Россия
office@granit-electron.ru

Толмачев Сергей Геннадьевич

Научно-исследовательская
лаборатория обеспечения
инновационных разработок
АО «Концерн «Гранит-Электрон»
Санкт-Петербург, Россия
office@granit-electron.ru

Соловьева Валентина Владимировна

Научно-исследовательская
лаборатория обеспечения
инновационных разработок
АО «Концерн «Гранит-Электрон»
Санкт-Петербург, Россия
office@granit-electron.ru

Аннотация. Рассмотрены способы синтеза генератора интегрированных динамических шумов управляющих сигналов пространственного положения летательного аппарата (ЛА) и сигналов управления антенной бортового радиолокационного визира (РЛВ) в режиме сопровождения объекта-цели по результатам спектрального и корреляционного анализа телеметрических (ТМ) измерений в условиях натурных испытаний. Такой генератор в динамической модели системы управления ЛА позволяет приблизить управление, реализуемое на математической модели к условиям натурных испытаний.

Annotation. The methods of synthesis of the generator of integrated dynamic noise control signals of the spacecraft (LA) and signals of control of the antenna of the onboard radar visor (RLV) in the mode of accompanying the target object based on the results of spectral and correlational analysis of telemetry (TM) measurements in the conditions of in-kind tests are considered. Such a generator in the dynamic model of the LA. control system allows you to bring the control implemented on the mathematical model closer to the conditions of natural testing.

Ключевые слова: Спектральный анализ, корреляционный анализ, телеметрические измерения, синтез генератора интегрированного шума.

Keywords: Spectral analysis, correlation analysis, telemetry measurements, synthesis of integrated noise generator.

I. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] указана целесообразность использования результатов анализа параметров ТМ измерений $X(1:10, t)$ в качестве модели интегральных динамических возмущений: угловых параметров линии визирования цели $\psi_{\text{ц}}(t), \vartheta_{\text{ц}}(t)$; угла поворота антенны РЛВ ($\psi_a(t), \vartheta_a(t)$) относительно ЛА, ориентации ЛА ($\psi(t), \vartheta(t), \gamma(t)$), а также $D_{\text{ц}}(t)$ – дистанции от ЛА до цели, высоты и бокового отклонения $H_{\text{ла}}(t)$ и $Z_{\text{ла}}(t)$.

Измеряемые ТМ параметры движения ЛА содержат в себе различные составляющие:

1) **Программное движение** – идеальное движение, соответствующее управляющим сигналам системы управления объектом как идеальным звеном или звеном с известной передаточной функцией.

2) **Движение по отработке возмущений** (изменений параметров атмосферы в зависимости от высоты, ветра и движения цели) как следствие парирования изменений величины углов скольжения и атаки с целью движения по заданной программной траектории.

3) **Переходные процессы** отработки управляющих сигналов. В силу инерционности объекта управления (ЛА или РЛВ) реальное движение соответствует программному движению только в установившихся режимах, когда переходным процессом можно пренебречь, в противном случае его необходимо учитывать.

4) На движение объекта оказывают влияние **возмущения внутри системы** управления, возникающие из-за нелинейных характеристик элементов контура управления, дискретизации сигналов управления по величине и времени, неконтролируемые, например, упругие колебания ЛА или антенны РЛВ.

С точки зрения РЛВ все **составляющие движения ЛА влияют на угловое положение линии визирования цели**. Определив направление на цель (захват цели) относительно ЛА, контур сопровождения обеспечивает сопровождение направления на цель, относительно корпуса ЛА в пределах диаграммы направленности антенны (ДНА) и дистанции ЛА – цель.

В настоящей работе данные ТМ измерений: угловые координаты цели относительно ЛА $\psi_{\text{ц}}(t)$ и $\vartheta_{\text{ц}}(t)$; углы поворота антенны РЛВ, относительно корпуса ЛА $\psi_a(t)$ и $\vartheta_a(t)$; углы поворота ЛА $\psi_{\text{ла}}(t), \vartheta_{\text{ла}}(t), \gamma_{\text{ла}}(t)$; дистанция до цели $D_{\text{ц}}(t)$, высота ЛА $H_{\text{ла}}(t)$ и его боковое отклонение $Z_{\text{ла}}(t)$ **принимаются за реальные изменения траекторных параметров $X(t)$** с известным шагом по времени.

В качестве идеального изменения параметров на относительно коротком интервале 1–10 секунд, принимается их равномерное изменение $X_{\text{и}}(t)$ от начальной до конечной точки на этом временном интервале или определяемая расчётным путём по известным координатам цели и летательного аппарата. Полагаем, что разность этих процессов $X_r(t)$ несёт в себе информацию о пере-

численных динамических помехах (возмущениях), интегральную оценку которых делаем при помощи анализа ТМ измерений каждого параметра. Для оценки частотных свойств интегральных динамических возмущений используется $Xrc(t)$ - центрированная функция $Xr(t)$.

Принимаем известными значения параметров на временном интервале начала t_n и окончания t_k процесса, обусловленные алгоритмом функционирования системы управления. Аналогичная ситуация возникает для угловых параметров движения ЛА, например, изменение углового положения ЛА в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также высоты, при совершении маневров типа «Змейка», «Горка» или «Сpirаль» [3], когда известны значения t_n и t_k . Это может быть любой из угловых параметров $X(1:10, t)$, примеры анализа которых приведены в [4–7].

II. СИНТЕЗ ГЕНЕРАТОРА ИНТЕГРИРОВАННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В [2, 4] приведены спектры и $Xrc(3:4, t)$ изменения показаний углового положения антенны ГСН (ψ_a и ϑ_a) в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно на интервале наблюдения от t_n до t_k , проиллюстрированные на рис. 1, а,б.

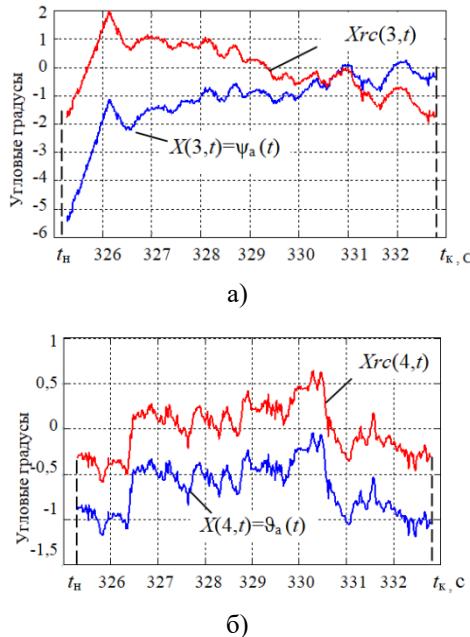


Рис. 1. а) $\psi_a(t)$ и б) $\vartheta_a(t)$, линии синего цвета, и центрированные отклонения их от равномерного изменения – линии красного цвета $Xrc[3:4, t]$

Анализ частотного спектра этих измерений показал преобладание низкочастотных гармоник на частотах в пределах единиц и долей Гц (рис. 2, а,б).

Указанные спектры характеризуют частотные свойства интегральной динамической помехи, воспринимаемой РЛВ как аддитивный шум.

Спектры переменной составляющей $Xrc(n=1:3)$ в диапазоне частот до 3 Гц, получены для параметров ТМ из массива измерений при числе измерений $N=600$ и

числе оцениваемых по амплитуде гармоник спектра $N=600$ с шагом 0,005 Гц. На рис. 2 спектры выделены красным цветом: а) $Xrc(3)$, соответствующий ψ_a , и б) $Xrc(4)$, соответствующий ϑ_a .

Современные программно-аппаратные средства позволяют синтезировать сигналы с заданной спектральной плотностью. Наиболее востребованным является сигнал типа «белый шум» с заданной спектральной плотностью в требуемом диапазоне частот [4–7].

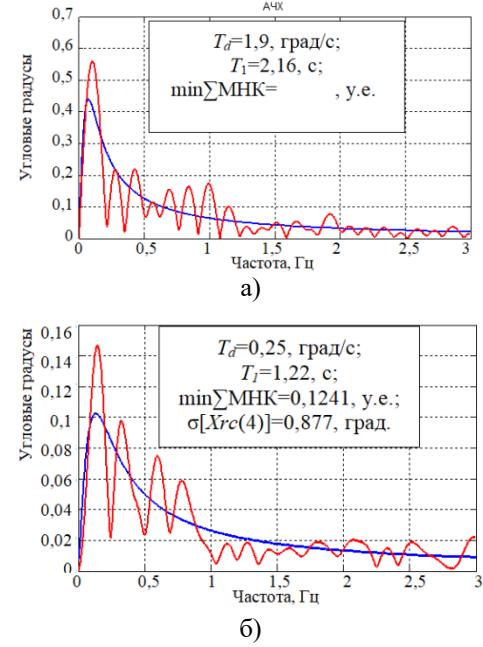


Рис. 2. Спектры переменной составляющей для углового положения антенны: а) $Xrc(3)$, ψ_a , б) $Xrc(4)$, ϑ_a и АЧХ аппроксимирующих фильтров

Это обстоятельство наталкивает на мысль формирования отклонений программного движения ЛА, пропуская белый шум через фильтр с заданной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), которая определяется на основании спектрального анализа функции $Xrc(t)$.

Пример такой аппроксимации огибающей спектра $dX(t)$ при помощи линейных фильтров второго порядка показан на рис. 2.

Выбором передаточной функции фильтров удалось [1, 6] получить аппроксимацию низкочастотной части спектра от 0 до 5 Гц в ряде случаев $X[8:10]$ с точностью не хуже 10% от максимальных значений на частотах, соответствующих экстремальным значениям АЧХ спектра ТМ измерений.

Для аппроксимации частотных свойств $dXrc$ предлагается использовать линейный фильтр с передаточной функцией $W_\phi(p)=T_dp/(1+T_1p)^2$, где p – оператор дифференцирования. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра, $A_\phi(\omega)=T_d\omega/(1+(T_1\omega)^2)$, аппроксимирует низкочастотную часть спектра.

Значения T_d и T_1 выбираются методом наименьших квадратов (МНК), обеспечивая минимальное значение суммарной квадратичной разницы амплитуд гармоник спектра $A_\phi(f_i)$ и соответствующих по частоте $A_\phi(f_i)$ – амплитуде АЧХ фильтра аппроксимации, при $N=600$ и

$N_f=600$. Числовые значения параметров фильтра T_d и T_1 , указаны на рис. 2, а) $Xrc(3)$, соответствующие отклонениям ψ_a , и б) $Xrc(4)-\vartheta_a$.

В качестве основы генератора интегрированного динамического шума выберем белый шум $U_{бш}(1:N)=\text{randn}(1, N)$ с интервалом квантования dt за время наблюдения сигнала $N \cdot dt$. Среднее квадратичное значение этого шума $\sigma_{бш}=1$.

Пропустим сигнал шума $U_{бш}$ через фильтр с передаточной функцией W_ϕ . На выходе фильтра сигнал $X_\phi(1:N)$ имеет значение σ_ϕ , отличное от σ_x сигнала Xrc .

$$\sigma_{x\phi} = (\Sigma(X_\phi(i=1:N)^2)/N)^{0.5}; \quad \sigma_x = (\Sigma(Xrc(i=1:N)^2)/N)^{0.5}. \quad (1)$$

Нормируем сигнал X_ϕ на выходе фильтра по σ_x и получим модель интегрального сигнала динамического шума на временном интервале $t_{\text{нк}}$

$$U_X(1:N) = (X_\phi(i=1:N) \sigma_x / \sigma_\phi). \quad (2)$$

Таким образом, получим $U_X(1:N)$ – дискретный сигнал шума, который по спектральному составу и дисперсии соответствует $Xcr(1:N)$.

III. СИНТЕЗ ГЕНЕРАТОРА ИНТЕГРИРОВАННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА $XRC(t)$

В отличие от согласования частотного спектра $Xrc(t)$ как свойства случайного процесса с генератором белого шума, воспользуемся авторегрессионной моделью для формирования реализаций динамического шума. Авторегрессия – это модель временного ряда, в которой наблюдения на предыдущих временных шагах используются в качестве входных данных для уравнения регрессии для прогнозирования значения на следующем временном шаге. Используем приближенную линейную модель авторегрессии порядка p в виде передаточной функции фильтра [5]:

$$H(z) = \sigma_{бш} / (1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{p+1} z^{-p}). \quad (3)$$

Порядок фильтра p и его коэффициенты a_i определяются на основе автокорреляционных свойств исходного процесса $Xrc(t)$.

На рис. 3 в качестве примера приведены три реализации процесса $Xrc(2,t)$, полученные с помощью модели авторегрессии шестого порядка свойств исходного процесса $Xrc(t)$ трёх пусков ПКР по одной мишени в разное время и различных метеоусловиях.

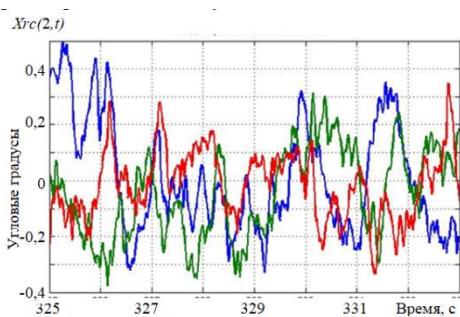


Рис. 3. Реализация процесса $Xrc(2,t)$, полученные с линейной моделью авторегрессии

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Два рассмотренных способа синтеза генератора интегрированной динамической помехи приводят к схожим результатам.

Недостатком спектрального способа по сравнению с корреляционным является большая чувствительность к равномерности спектральной плотности белого шума. Поэтому приведенная методика дополнительной коррекции параметров фильтра для большей схожести $U_X(1:N)$ и $Xcr(1:N)$ во временной области.

Корреляционный способ свободен от этого недостатка, однако число подбираемых параметров фильтра здесь существенно больше.

Общим недостатком принимаемых моделей шума является их детерминированность, то есть основная низкочастотная часть их и числовые значения параметров справедливы только для конкретных частных условий и для статистического моделирования не пригодны. Для устранения этого недостатка необходимо набрать представительную выборку ТМ измерений натурных испытаний.

Другой путь – провести декомпозицию «интегрированной помехи», установив все причинно-следственные связи от физических причин возникновения возмущений до взаимовлияния на подсистемы и в конечном итоге на управление линией визирования цели и движением ЛА. Эти вопросы выходят за рамки настоящей статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Шаров С.Н., Толмачев С.Г. И.И., Соловьев В.В. Программа синтеза модели генераторы интегральной помехи бортовому радиолокационному визиру. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2021617757 по заявке №2021616878 от 04.05.2021г., дата гос. регистрации 19.05.2021. – 93 с.
- Александров А.А., Дворянин М.С., Морозов В.В., Петухова Е.С., Подоплекин Ю.Ф., Соловьев А.В., Соловьев В.В., Толмачев С.Г., Шаров С.Н., Яцковская И.М. и др. Посадка БПЛА на суда: проблемы и решения / под научн. ред. д.т.н., профессора Коржавина Г.А. – СПб.: Судостроение, 2014. – 192 с.
- Коржавин Г.А., Подоплекин Ю.Ф., Шаров С.Н. Некоторые особенности и возможности радиолокационного наблюдения морских надводных объектов с космических аппаратов // Известия РААН. – 2007. – Вып. 3 (53). – С. 34-39.
- Скольник М. Справочник по радиолокации: пер. с англ. в 4-х т. Т. 1 // под ред. Я.С. Ицхоки. – М.: Советское радио, 1976. – 456 с.
- Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 976 с.
- Шаров С.Н. Модели интегральной оценки динамического шума сигналов управления летательного аппарата // Сборник трудов научно-практической конференции РААН. Радиоэлектронное и ракетное вооружение ВМФ: Взгляд в будущее. – СПб.: АО «Концерн «Гранит-Электрон», 2020. – С. 96-108.
- Подоплекин Ю.Ф., Соловьев В.В., Толмачев С.Г., Шаров С.Н. Интеллектуальные информационные управляющие системы со сложными локационными сигналами для беспилотных летательных аппаратов. – СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», АО «Концерн «Гранит-Электрон», РААН, 2020. – 244 с.

Software Effort Estimation of Web Applications Using Fuzzy Cognitive Mapping

Sharma Ashutosh

Institute of Computer Technology and Information Security
Southern Federal University
Taganrog, Russia
ashutosh@sedu.ru

Tselykh Alexey

Institute of Computer Technology and Information Security
Southern Federal University
Taganrog, Russia
tselykh@sedu.ru

Annotation. With the development of information and communication techniques, new methods emerge for effort estimation in the software engineering research field. The models are categorized as algorithmic or non-algorithmic. Software project efforts are effectively determined by Machine Learning (ML) techniques which consume the project characteristics array for project cost estimation. However, choosing right technique is a challenging task. At the same time Web applications are becoming more refined as it is not only for uploading and fetching the data but also fusing the data from various sources and analyzing the data using ML techniques. The Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) technique is detailed in this paper for the ML-based effort estimation of Web applications. The paper presents state-of-the-art and basic concept of research.

Keywords: *Software Effort Estimation, Machine Learning, Web Applications, Fuzzy Cognitive Mapping.*

I. INTRODUCTION

In complex systems, decision-making and modeling are done effectively by FCM. For the various application domains, the FCM systems are utilized for pattern recognition, decision support tool and the socio-economic development planning. The FCM is an efficient technique for numerical and linguistic forecasting of time series. The FCM system has mainly two types: manual FCM and the automated FCM [2]. The way for the FCM formation is the only difference between these two types of FCMs. The experts manually produce the manual FCMs and the information sources produced the automated FCMs numerically. Manual production of FCM becomes difficult sometimes when the interference of the experts could not be enough for the problem solution. Because of the difficulties in manual FCM generation, the computational methods development for FCM learning is needed for the FCMs automation [3]. In every field, the prediction is the dynamic issue and it is considered as very com-

plex which exhibits high uncertainty. This is a challenging problem which leads to large number of approaches and produced accurate results. In the research community, substantial efforts are recorded which focused on two aspects: prediction's important aspect is accuracy and the timelines for delivering the accurate prediction. The framework general application is demonstrated by utilizing the FCM and the framework validation involves the framework's concrete applications. In the industry environment, different organizations studies are required for the framework concrete applications. The FCMs main merits are the capabilities of flexibility and adaptability. The FCMs interest is maximum in the industries, on the part of researchers, robotics, medicines and information technologies.

The Web applications presence is universal and Web-centric applications are predictable to come due to perpetual need of business. Today, Web applications are becoming more refined as it is not only for uploading and fetching the data but also gather data from various resources and analyzing by the artificial intelligence. The ML-based software estimation techniques are very popular for the parametric and the nonparametric environment for accuracy in prediction. The historical project data availability is the ML techniques essential necessity [4]. The project characteristics spent on the project building like lines of code (LOC) utilized in project, class and the actual effort are usually contained in the data. The efforts estimation is directly provided by the software cost estimation by the projects characteristics and for the context, ML-based techniques are required to be trained. When trained with the same dataset, estimation of all the ML techniques are not equal, some of them are superior comparatively. Verification is done by the ML technique's performance parameter examination. However, for individual project parameter configurations, superior most ML technique performance is also lagging sometimes.

In the given area, extraction of knowledge from an expert is denoted by the FCM. In the FCM drawing, the better consistency is possible in the system modeling if more than one expert is utilized. The final model reliability is improved allowed by the different expert's aggregation process. The process of two FCM aggregations is presented in Figure 1 where investigated systems are describing by different concepts.

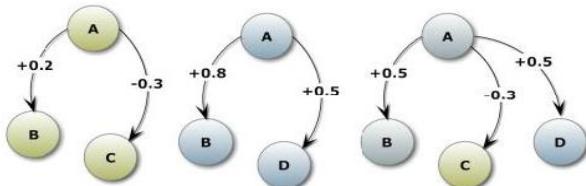


Fig. 1. Typical FCM process of aggregation

The final map made by this process is less susceptible to the erroneous beliefs. It is advantageous if there is possibility of FCM aggregation into the knowledge structure. In FCM, there is no limitation of the number of experts, more the experts, higher the reliability. The average of sample size will congregate with underlying matrix if the sample size increases. The simplest procedure is based on the causal weight matrixes mathematical transformation. The same concepts characterized the maps then the entire system represented FCM aggregation can be calculated easily as their causal matrixes weighted average or median. But regarding the concept, the different experts have different opinions in the modeling. So each causal matrix is augmented by new rows and columns and the operations are performed over them.

The complex relationships within an environment method are provided by the FCM graph structures for the environment improvement. The problem with no data is modeled by utilizing the FCMs. The what-if analysis is done by utilizing the FCM where alternative scenarios are considered. The environment behavior is represented by the concept nodes within FCM. The arcs are utilized for the concept connection which shows the concept relations. The FCM development is based on expert's knowledge utilization forming environment framework. The concepts are identified by utilization of expert acknowledgement. The framework is analyzed by utilizing the FCM for demonstration. The framework validation in contrast involves the concrete applications framework. It requires different organizations case study in an industry environment.

A. Contribution:

The aim of the presented technique is to provide the organized way for the Web application estimation technique selection from the predefined set. The performance parameter i.e., means square error is measured to indicate the technique estimation for well performance in many cases.

B. Organization

The organization of the paper is as follows. Section II offers an overview of the exhaustive literature survey followed by contribution of the manuscript. Section III provides the concept of methodology adopted in the manuscript. Section IV concludes the paper.

II. STATE-OF-THE ART LITERATURE REVIEW

For the non-linear and the complex systems, the FCM are very powerful tool as they are directed graphs with feed-backs. The experts create the FCM models and the building of these models is hard with the increasing number of variables [5]. The fuzzy cognitive maps automated generation is provided by the various methods in the last decades. The large number of variables handling is difficult by the presented technique and it is the main drawback. The new strategy is brought out by the presented method called as concept by concepts approach (CbC) for the FCM learning. With the high precision, large sized FCM model generation is enabled by utilizing the historical data. The FCM and Agent Based Modeling (ABMs) methods are complementary represents interacting agents over time. The agent subjective behaviors encapsulate which is not specifying by the method but it lacks the scaling ability to a population [6]. The emerging practice review is presented which combines the FCM and the ABM. Three different high-level architectures are revealed by the analysis for the combined utilization of these two methods. The authors in this paper presented the prediction model which combines the fuzzy cognitive maps (FCM) and Support Vector Machines (SVM) for increment of the accuracy [7]. The FCM part is utilized by the presented technique for the correlation pattern discovery which exists between the data variables and latent variables are formed. The prediction capabilities are also improved when the variables are fed to the SVM part. The demonstration of the hybrid model efficacy is done on the different domains. The efficiency of the presented model is better as compared to the existing models as shown in Table 1 in details.

A new Structure Optimization Genetic Algorithm (SOGA) is presented for decision support system modeling [6-8]. The FCM model is constructed and optimized automatically by the presented approach. The error function is defined by the SOGA for the FCM complexity as there are number of connections between them. For fuzzy cognitive maps learning, SOGA is utilized for the analysis purpose. SOGA is compared with the FCM learning algorithms and simulations were done. The FCM model structure is reduced significantly by the utilization of the SOGA as obtained by the results. The model complexity construction is difficult task; hence the effective techniques are required [7]. Based on a fuzzy cognitive map (FCM), the nested structure is created at the higher map which is decomposed into other FCM. The whole nested structure is restructured through the dynamic optimization process to derive relationships between map concepts. The hidden relationships discovering is allowed by this process among map concepts. The suggested nested approach application is presented by the paper for the forecasting of the time series and the decision making. A framework is detailed in this paper for the test manager assistant for the AI technique evaluation in testing the software [8]. The framework evaluation is employed by the Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) and the decision analysis is made easier. The presented technique effectiveness is shown by the simulations analysis. FCM has emerged gradually as a powerful tool and the applicability of the simulation mechanism for different applications. The system states are investigated by the different methods and FCMs are constructing for the complex systems [9]. The fuzzy neural network is presented in this paper for the FCMs learning ability. The conventional FCMs are incorporated by the presented ap-

proach with the membership functions determination and the causalities quantification. The causalities are described by the mutual subset-hood in the fuzzy neural network. The effectiveness of the presented approach is confirmed by the simulation. Authors in this paper describe the FCMs for the autonomous entities modeling in the dynamic environment [10]. The FCM general design is offered in this paper for the autonomous agent's decision making and this concept is ca-

tegorize into three classes like Requirement, Activities and the states. The features supporting decision-making is enabled by the classification such as sensors input processing. The presented method is utilized as a decision making for the simulation of human activities in the ambient model and the scenario-oriented mechanism is combined for proving the modularity.

TABLE 1: METHODOLOGIES ADOPTED IN EXISTING LITERATURE REVIEW

Methodology Adopted	Advantages	Disadvantages	Reference
Hybrid prediction model combining Fuzzy Cognitive Maps (FCM) and Support Vector Machines (SVM)	<ul style="list-style-type: none"> Improved prediction capabilities. High efficiency. High accuracy. 	<ul style="list-style-type: none"> Complex and lacking maturity. 	[5]
Structure Optimization Genetic Algorithm (SOGA) for FCMs learning	<ul style="list-style-type: none"> Modeling complex decision support systems. significantly reduce. the structure of the FCM model. Low complexity. 	<ul style="list-style-type: none"> Integrated waste management. Speed is low. 	[6]
Nested structure, based on a FCM	<ul style="list-style-type: none"> Provides a more detailed data. Precise representation of complex time series data. 	<ul style="list-style-type: none"> Models complexity. 	[7]
Framework to assist test managers to evaluate the use of AI techniques	<ul style="list-style-type: none"> Highly effective. Decision analysis is easy. Facilitate the application of AI techniques. 	<ul style="list-style-type: none"> Decision is more difficult to determine. Both direct and indirect. 	[8]
A fuzzy neural network to enhance the learning ability of FCMs	<ul style="list-style-type: none"> FCM models of investigated systems can be automatically constructed from data. Provides more transparent interpretation for causalities in FCMs. High flexibility, adaptability and fuzzy reasoning. 	<ul style="list-style-type: none"> Computation complexity. 	[9]
Design for an FCM adjusted for the decision-making of autonomous agents	<ul style="list-style-type: none"> Faster system reactions. The adjustable frequency of computations in a simulation. 	<ul style="list-style-type: none"> Cost ineffective. 	[10]
Fuzzy cognitive maps with their learning algorithms investigation.	<ul style="list-style-type: none"> Predict the future of a complex financial system. Confirms the benefits of fuzzy cognitive maps applications. 	<ul style="list-style-type: none"> unclear and insufficient control 	[11]
Designing an affective decision system for forecasting artificial emotions.	<ul style="list-style-type: none"> Emulate or anticipate human reactions efficiently. Have critical impact over intelligence. 	<ul style="list-style-type: none"> Computational Complexity. 	[12]
IoT is presented and the modification of the IoT concept in the form of intelligent space.	<ul style="list-style-type: none"> Transfer and process huge amounts of data. 	<ul style="list-style-type: none"> Inefficient resource utilization. 	[13]
Deals with specification of needs for a robot control system	<ul style="list-style-type: none"> High area of navigation, movement stabilization, action selection and path cost evaluation. 	<ul style="list-style-type: none"> Require a certain measure of intelligence. 	[14]
An agent-based simulation system using machine learning	<ul style="list-style-type: none"> Effects of uncontrollable factors are removed effectively. Robust team design. 	<ul style="list-style-type: none"> Cost ineffective. 	[15]
Swarm Intelligence for learning parameters characterizing FCM.	<ul style="list-style-type: none"> Obtain accurate maps. Allowing the simulation of the system. Extraction of relevant knowledge. 	<ul style="list-style-type: none"> Management is not adaptive. 	[16]
Cognitive mapping research used in real environmental management applications	<ul style="list-style-type: none"> Facilitate the development of participatory environmental management plans. Ability to include abstract and aggregate variables in models. 	<ul style="list-style-type: none"> Complex relationship. 	[17]
Method of selecting the damping factor (DF) based on finding the boundaries	<ul style="list-style-type: none"> Impact vectors are guaranteed to prevail. Rapid rearrangement and reversal of the ranks. 	<ul style="list-style-type: none"> Complex system development. Less execution Time. 	[18]
Algorithm of influence controls (AIC)	<ul style="list-style-type: none"> Imposes no restrictions on the direction, sign or range of weights. Allow for the assessment of the compliance with the degree of co-directionality of the response vector. 	<ul style="list-style-type: none"> Ineffective managerial decisions. 	[19]
New method of clustering based on minimizing the elastic energy functional	<ul style="list-style-type: none"> Represents a causal relationship between the graph vertices efficiently. Does not require user intervention. Computationally efficient. 	<ul style="list-style-type: none"> Less processing speed. 	[20]

In the economic modeling, the FCM is a significant tool and its aim is the investigation of the genetic algorithms based FCM utilization [11].

The FCM models predict the complex financial system clearly in this study. The benefits of FCM applications are confirmed in this study for the researchers and policy makers. This paper presents the Thayer's emotion model and

FCM based proposal for the forecasting artificial emotions [12]. An innovative method is provided by the author for artificial emotions forecasting and for the affective decision system design. An experiment included in this work with different artificial scenarios for the proposal testing. Different emotions are generated by the each scenario to artificial model accordingly. Authors in this paper detail the cheap sensors development and the transfer possibility of data [13]. The sensors movement possibility from the robots with IoT is presented and the IoT concept is modified in intelligent space. The distributed networked sensors potential is clarified with the route tracking example and by utilizing the FCM, data is processed for the robotic navigation. The adaptation approaches modifications are presented namely particle swarm optimization and migration algorithm. Fuzzy Cognitive Maps (FCM) penetrates to areas as control systems which include the robotics characterized by its distributiveness [14]. The needs for a robot control system are specified by the authors and the defined tasks are divided into different decision levels. Authors details the various machine learning techniques utilized for the project efforts determination based on the historical project-related dataset. The project characteristics array is consumed by these techniques for the project cost estimation. The project cost is determined by the right technique selection and it is very significant [15]. The FCM approach is presented for the machine learning-based software estimation technique recommendation. The different estimation techniques are utilized by the current analysis and the supremacy of one estimation technique is declared by the mean square error. The project characteristics presence should not be ignored by the effort estimation technique as shown by the experimental results. For modeling and simulations, FCM has become an important soft computing method in recent years [16]. The concepts are involved in it as they are recurrent structures which describe the causal connections.

The Swarm Intelligence based two abstract models are described in this paper by the authors for FCM characterization. The accurate maps are obtained at the end that allows the system simulation and relevant knowledge extraction. Authors presented the FCM approach for ecological creation with expert's knowledge [17]. These maps are system's qualitative models which consist of variables and their relationships. In environmental management applications, utilization of cognitive mapping research is described. Different stake-holders perception is examined to facilitate the environmental management plans development. Many advantages are offered by the FCM for the modeling which includes the models aggregate variables. The author presented the damping factor (DF) selection based method based on finding the boundaries of the domain range for an effective controls model [18]. It reflects the influence spread on the weighted signed graphs which is a fuzzy cognitive map (FCM). In a real-world socioeconomic system, the entire system functioning is affected by the incorrect determination. It leads to incorrect managerial decisions and misconceptions [19]. Authors presented a new clustering based method on elastic energy functional (EEF) minimization of directed signed graphs. There are three distinctive features in the method [20]. The graphs edge weights are set by the system original model and causal relationship between the graph vertices are represented by the each weight and the order vertices order generated by the algorithm which reflects the ratio of intra-cluster.

III. CONCEPT OF RESEARCH METHODOLOGY

The web effort estimation has four divergent approaches like case-based reasoning (CBR), stepwise regression (FSR), classification and regression trees (CART), and Bayesian networks (BNs). The tabu search meta-heuristic methodology utilization is examined by the researchers in conjunction for the parameters precise selection. It is used for the web applications effort estimation [21].

Many researchers are led by the applications based on the web in different domains and it is rising significantly. It distinguishes the web applications effort estimation as a current research valuable area. The Fuzzy ID3 decision effectiveness is also checked in the effort estimation. The standard fuzzy set concepts are incorporated by the standard research in ID3 decision tree. An unmarked method is also demonstrated for the web based project effort determination utilizing a content management framework (CMF) [22]. A number of researchers are influenced by the mobile applications for the various issues identifications and for the efficient mobile applications development, their solutions are utilized. To implement the presented technique, there are different steps for processing and which are described in detail. The entire methodology is represented pictorially in Figure 2.

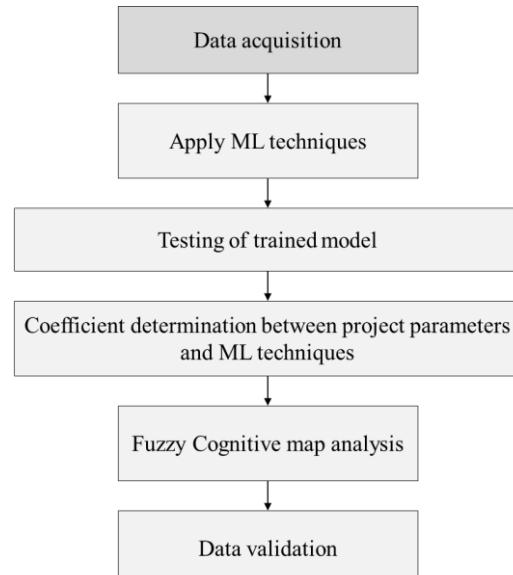


Fig. 2. Schematic diagram of the presented technique

A. Step 1: Database Acquisition

First of all, dataset is viewed carefully and its suitability is verified with the ML-based estimation techniques. The dataset is prepared from the projects of the student in the university. Number of Function Points (NFP), Number of Multimedia Files (NMM), Number of Building Blocks (NBB), and Number of XML, HTML, and query Language links (NHL). The segregation of the project details in the functional attributes is preferred generally for the analysis based on ML. The attributed of the projects are specific to the applications of the web and utilization is repeatedly effort estimation of web application.

B. Step 2: Apply ML Techniques

For training estimation models, five generally utilized ML techniques are recognized for the estimation of the training models on the database. The Case-Based Reasoning

(CBR), Random Forest (RF), Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), and Multiple Linear Regression (MLR) are the different techniques which are utilized.

C. Step 3: Testing of Trained Model

The over-fitting irregularity is overcome by the ML technique which is trained and then tested projects. For the validation purpose, few projects are utilized. The ML techniques are compared by utilizing the mean square error (MSE) as performance metrics. The actual effort and the estimated effort difference were calculated for each of testing data tuple. The MSE values were calculated after the error terms square averaging.

D. Step 4: Coefficient Determination

Between the different employed techniques and different project characteristics, correlation values between the MSEs are calculated which are established in this step of processing. It is observed that the error is strongly influenced by the NFP strongly and positively in ANN. It is inferred that the higher the applications functional points, lesser the ANN importance. Similarly, as an estimation technique choice, number of multimedia files presence attracts the random forest.

E. Step 5: Fuzzy Cognitive Maps Analysis

The FCM are built by utilizing the correlation results for the further analysis.

F. Step 6: Data Validation

In the last step, validation is done after the analysis of FCM on the projects' data.

The Figure 3 represent the recommendation system which is FCM based.

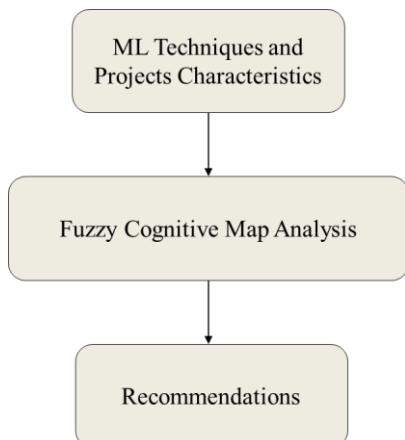


Fig. 3. Recommendation system based on FCM

Relationship between the variables is represented by the directed graphs which is called FCM. The FCM utilized for the determination of the causal relationships between the characteristics of project and the ML technique performance [23, 24]. The existing relationships insight is got by the project variables and ML-technique performance's correlation coefficient. The driving factors and the receiving factors are two classes of factors utilized as project parameters and ML techniques. The positive and negative relationship be-

tween the two factors and the related degree is determined by the correlation coefficient. Number of Function Points (NFP), Number of Multimedia Files (NMM), Number of Building Blocks (NBB), and Number of XML, HTML, and query Language links (NHL). The influence of the NMM driving factor is strong over the Multiple Linear Regression (MLR) and support-vector networks (SVM) while in case of SVM and CBR, impact is positive. For MLR and RF, it is negative. The NHL links influence the error in SVM while on the ANN, RF, and CBR, it has negative influence.

There are different projects contained in the data having different attributes. Number of Function Points (NFP), Number of Multimedia Files (NMM), Number of Building Blocks (NBB), and Number of XML, HTML, and query Language links (NHL). For training estimation models, five generally utilized ML techniques are recognized for the estimation of the training models on the database. The Case-Based Reasoning (CBR), Random Forest (RF), Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), and Multiple Linear Regression (MLR) are the different techniques which are utilized. The ML techniques are compared by utilizing the mean square error (MSE) as performance metrics. Through the different existing techniques, projects estimations are presented in Table 2.

TABLE 2: RESULTS BY EXISTING TECHNIQUE'S EXPERIMENTS

Project	ML technique's estimated techniques				
	ANN	MLR	SVM	RF	CBR
1	22	18	15	18	15
2	32	23	33	21	28
3	14	21	13	17	26
4	17	12	18	11	17
5	31	17	27	21	39

The analysis of the FCM is required because a project characteristic is not present in the project configuration. In every project configuration, amount of each driving factor is present. Thus, assessment of the overall system is needed to take the decision that which technique is preferred for configuration of the projects. The validation is done in the last step after the FCM analysis on the data.

IV. CONCLUSION

The relationships transformation into the quantitative measures by the FCM is utilized for the software assessment approaches recommendation. The correlation values are mapped into the fuzzy numbers by the linguistic values. The overall system equilibrium is taken into account for the underpinning factors mutual influence derivation. The FCM is the potential technique to count on when the scientific knowledge is very complex. The main error of FCM is that the if-then statements can code in it. However, only synergistic interaction can be produced by FCM among the factors. The FCM development is based on expert's knowledge utilization forming environment framework. The FCM can be extended for finding the complex abstract relationships between the issues of the mobile application.

REFERENCES

1. Meliadou A., Santoro F., Nader M. R., Abou Dagher M., Al Indary S., & Abi Salloum B. Prioritising coastal zone management issues through fuzzy cognitive mapping approach // Journal of environmental management. – 2012. – Vol. 97. – P. 56-68. – <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.11.006>.
2. Reckien D. Weather extremes and street life in India—Implications of Fuzzy Cognitive Mapping as a new tool for semi-quantitative impact assessment and ranking of adaptation measures // Global Environmental Change. – 2014. – Vol. 26. – P. 1-13. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.03.005>.
3. Gray S.A., Gray S., De Kok J.L., Helfgott A.E., O'Dwyer B., Jordan R., & Nyaki A. Using fuzzy cognitive mapping as a participatory approach to analyze change, preferred states, and perceived resilience of social-ecological systems // Ecology and Society. – 2015. – Vol. 20 (2). – P. 1-14. – <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07396-200211>.
4. Lousada A.L., Ferreira F.A., Meidutė-Kavaliauskienė, Spahr R.W., Sunderman M.A., & Pereira L.F. A sociotechnical approach to causes of urban blight using fuzzy cognitive mapping and system dynamics // Cities. – 2021. – 108. – 102963. – <https://doi.org/10.1016/j.cities.020.102963>.
5. Christodoulou P., Christoforou A., & Andreou A.S. A hybrid prediction model integrating fuzzy cognitive Maps with Support vector machines // In International Conference on Enterprise Information Systems. – April 2017. – No. 2. – P. 554-564. SciTePress. – <https://doi.org/10.5220/0006329405540564>.
6. Poczetka K., Yastrebov A., & Papageorgiou E.I. Learning fuzzy cognitive maps using structure optimization genetic algorithm // In 2015 federated conference on computer science and information systems (FedCSIS)2015. – P. 547-554. IEEE. <https://doi.org/10.15439/2015F296>.
7. Poczetka K., Papageorgiou E.I., & Gerogiannis V.C. Fuzzy Cognitive Maps Optimization for Decision Making and Prediction // Mathematics. – 2020. – No. 8 (11). – 2059. – <https://doi.org/10.3390/math8112059>.
8. Larkman D., Mohammadian M., Balachandran B., & Jentzsch R. Fuzzy cognitive map for software testing using artificial intelligence techniques // In IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations 2010, 328-335. Springer, Berlin, Heidelberg. – https://doi.org/10.1007/978-3-642-16239-8_43.
9. Song H., Miao C., Roel W., Shen Z., & Catthoor F. Implementation of fuzzy cognitive maps based on fuzzy neural network and application in prediction of time series // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2010. – Vol. 18 (2). – P. 233-250. – <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2009.2038371>.
10. Nachazel T. Fuzzy cognitive maps for decision-making in dynamic environments // Genetic Programming and Evolvable Machines. – 2021. – Vol. 22. – P. 101-135. – <https://doi.org/10.1007/s10710-020-09393-2>.
11. Sammour G., Alghzawi A., & Vanhoof K. A Fuzzy Cognitive Map Approach to Investigate the Sustainability of the Social Security System in Jordan // In ICEIS. – 2020. – No. 1. – P. 481-489. – <https://doi.org/10.5220/0009128304810489>.
12. Salmeron J.L. Fuzzy cognitive maps for artificial emotions forecasting // Applied Soft Computing. – 2012. – Vol. 12 (12). – P. 3704-3710. – <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.01.015>.
13. Vaščák, J., Pomšár, L., Papcun, P., Kajáti, E., & Zolotová, I. Means of IoT and Fuzzy Cognitive Maps in Reactive Navigation of Ubiquitous Robots // Electronics. – 2021. – No. 10 (7). – P. 809. – <https://doi.org/10.3390/electronics10070809>.
14. Vaščák J., & Reyes N.H. Use and perspectives of fuzzy cognitive maps in robotics. In Fuzzy cognitive maps for applied sciences and engineering. 253-266. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. – https://doi.org/10.1007/978-3-642-39739-4_15.
15. Pandey P., & Litoriya R. Fuzzy cognitive mapping analysis to recommend machine learning-based effort estimation technique for web applications // International Journal of Fuzzy Systems. – 2020. – P. 1-12. – <https://doi.org/10.1007/s40815-020-00815-y>.
16. Nápoles G., Grau I., Pérez-García R., & Bello R. Learning of Fuzzy Cognitive Maps for simulation and knowledge discovery. In Studies on Knowledge Discovery, Knowledge Management and Decision Making. – Paris: Atlantis Press, 2013. – P. 27-36. – <https://doi.org/10.2991/2013.4>.
17. Özesmi U., & Özesmi S.L. Ecological models based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach. Ecological modelling. – 2004. – Vol. 176 (1-2). – P. 43-64. – <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.10.027>.
18. Tselykh A., Vasilev V., & Tselykh L. Effect of Resonance in the Effective Control Model Based on the Spread of Influence on Directed Weighted Signed Graphs // In International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry, September 2019. – P. 270-280. – Springer, Cham. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-50097-9_28.
19. Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L., & Ferreira F.A. Influence control method on directed weighted signed graphs with deterministic causality // Annals of Operations Research. – 2020. – P. 1-25. – <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03587-8>.
20. Tselykh A., Vasilev V., & Tselykh L. clustering method based on the elastic energy functional of directed signed weighted graphs // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2019. – Vol. 523. – P. 392-407. – <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.02.031>.
21. Van der Sluis T., Arts B., Kok K., Bogers M., Busck A. G., Sepp K., ... & Crouzat E. Drivers of European landscape change: stakeholders' perspectives through fuzzy cognitive mapping // Landscape Research. – 2019. – Vol. 44 (4). – P. 458-476. – <https://doi.org/10.1080/01426397.2018.1446074>.
22. Dodurka M.F., Yesil, E., Ozturk, C., Sakalli, A., & Guzay, C. Concept by concept learning of fuzzy cognitive maps // In IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations. – 2013. – P. 577-586. – Springer, Berlin, Heidelberg. – https://doi.org/10.1007/978-3-642-41142-7_58.
23. Crooks AT, Wise S. GIS and agent-based models for humanitarian assistance. Computers, Environment and Urban Systems. – 2013. – Vol. 41. – P. 1100-111. – <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2013.05.003>.
24. Li Y., Bao T., Shu X., Chen Z., Gao Z. and Zhang, K. A Hybrid Model Integrating Principal Component Analysis, Fuzzy C-Means, and Gaussian Process Regression for Dam Deformation Prediction // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2021. – Vol. 46 (5). – P. 4293-4306. – <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04923-7>.

Разработка распределённой системы для управления транспортом в рамках стандарта МЭК 61499

Елькин Дмитрий Максимович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
delkin@sfedu.ru

Вяткин Валерий Владимирович
Department of Electrical Engineering
and Automation Aalto University
Aalto, Finland
vyatkin@ieee.org

Аннотация. Эффективные методы организации дорожного движения напрямую влияют на жизнь современных городов и городских агломераций. Распределённые системы для управления движением не отделены от точки применения управляющих воздействий, что в положительную сторону оказывается на процессах управления. В работе рассмотрен процесс разработки системы для управления транспортом в рамках стандарта МЭК 61499. Разработанную в рамках стандарта систему управления, можно достаточно быстро модифицировать подстраиваясь под изменяющуюся организацию движения и дорожную инфраструктуру.

Annotation. Effective traffic management methods directly affect the life of modern cities and urban agglomerations. Distributed systems for motion control are not separated from the point of application of control actions, which has a positive effect on control processes. The paper considers the process of developing a system for transport management within the framework of the IEC 61499 standard. The control system developed within the framework of the standard can be quickly modified to adapt to the changing traffic organization and road infrastructure.

Ключевые слова: Управление транспортными потоками, распределённая система, автоматные модели, МЭК 61499.

Keywords: Traffic management, distributed system, functional blocks, IEC 61499.

I. ВВЕДЕНИЕ

Модель распределенной системы управления в соответствии со стандартом МЭК 61499 [1–3] может быть представлена как набор физических устройств (например, ПЛК), взаимодействующих между собой с помощью одной или нескольких сетей.

Функции, выполняемые системой автоматизации, моделируются с помощью программного приложения, которое может располагаться в одном устройстве (например, ПЛК), или может быть распределено между несколькими ПЛК.

Для управления транспортом в системе используется минимальная единица, называемая агентом. Агент, это элемент дорожной инфраструктуры (светофор, знак), который получает данные из внешней среды, обрабаты-

вает их, взаимодействует с другими агентами и на основе этого формирует управляющие воздействия на транспортный поток [4].

В первой части работы рассмотрена реализация агента перекрёстка и его модулей, во второй части работы рассмотрена реализация агента улично-дорожной сети и его модулей. Схема управления представлена на рис. 1.

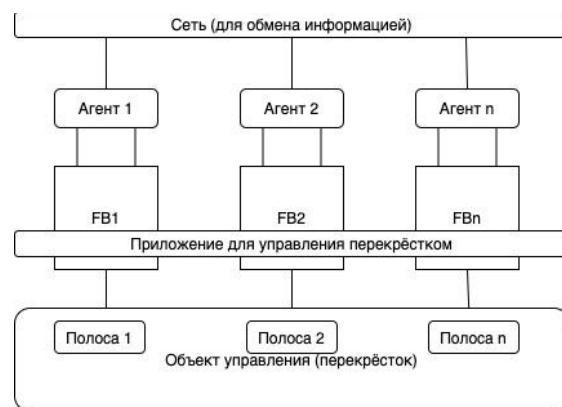


Рис. 1. "Схема управления"

II. АГЕНТ ПЕРЕКРЁСТКА

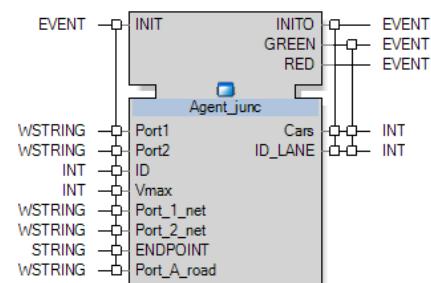


Рис. 2. «Функциональный блок агент перекрёстка»

Составной функциональный блок «Агент перекрёстка» изображен на рис. 2.

Входные события:

INIT – инициализация всех модулей агента

управления дорожной инфраструктурой, в данном случае, светофором. Алгоритм работы агента в случае подключения функции управления перекрёстком в ручном режиме из центра управления дорожным движением города.

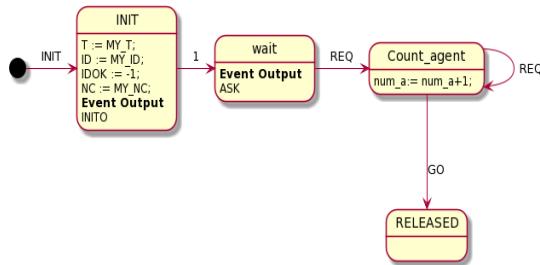


Рис. 7. «Диаграмма – подсчет агентов в сети»

На рис. 7 изображена диаграмма работы алгоритма по подсчету количества агентов, которые находятся в одной сети. Это необходимо для корректного формирования управляющих воздействий на транспортный поток, так как агенты перед тем, как разрешить доступ транспорту на перекрёсток запрашивают разрешение у всех агентов, находящихся на этом перекрёстке, и ожидают ответ. Пока ответ от всех агентов не пришел, выезд транспорту на перекрёсток, не разрешен.

Обмен данными с агентами на соседних перекрёстках, находящихся на этом же участке улично-дорожной сети, осуществляется с помощью модуля взаимодействия с агентами соседних перекрёстков. Модуль реализован как функциональный блок «Agent_net».

E. Функциональный блок «Agent_net»

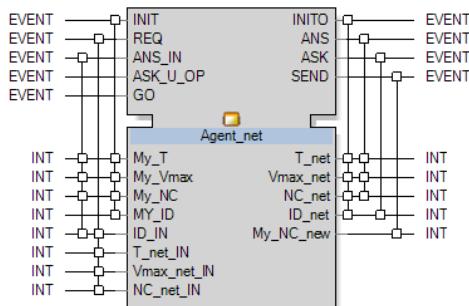


Рис. 8. Функциональный блок «Agent_net»

Функциональный блок Agent_net изображен на рисунке 8, реализует алгоритм обмена данных с агентами на соседних перекрёстках. Перед разрешением на проезд через перекрёсток, если агент связан по одному из направлений движения с соседним перекрёстком, он отправляет запрос для получения данных о транспортной ситуации по направлению движения. В ответ, агенту приходит информация о транспортной загруженности, максимальном количестве транспортных средств, времени ожидания. На основании этих данных формируется управляющее воздействие на транспортный поток.

Кроме других агентов перекрёстка агенты взаимодействуют с агентами УДС. Модуль взаимодействия с агентами УДС реализован в виде функционального блока «A_jun_road_com».

F. Функциональный блок «A_jun_road_com»

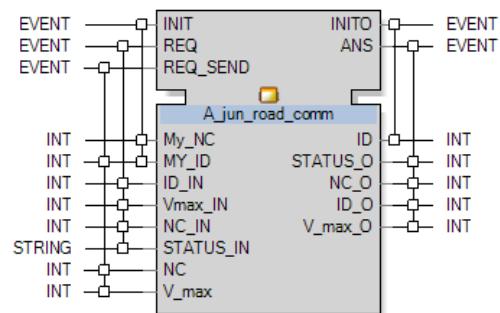


Рис. 9. «Функциональный блок A_jun_road_com»

Агент перекрёстка осуществляет обмен информацией о транспортной характеристике на подконтрольном участке улично-дорожной сети с агентом УДС, который изображен на рис. 9. На основании полученной от агента перекрёстка информации, агент УДС осуществляет формирование управляющих воздействий на транспортный поток.

Расчет времени доступа к общему ресурсу – перекрёстку производится в модуле «Алгоритм расчета времени работы».

G. Функциональный блок «Time_counter_comp»

Для того чтобы агент не заблокировал общий ресурс на неограниченное время, при постоянном потоке транспортных средств, исходя из транспортной загруженности подконтрольного агенту участка дорожной сети рассчитывается время, которое отводится агенту на доступ к ресурсу. Расчет времени производится в функциональном блоке «Time_counter_comp» который изображен на рис. 10.

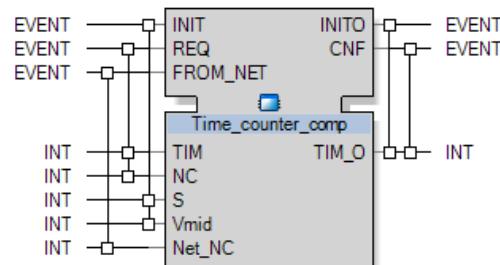


Рис. 10. «Составной функциональный блок «Time_counter_comp»

На вход блока поступают данные о транспортной загруженности, средней скорости транспортных средств, геометрической характеристике подконтрольного участка улично-дорожной сети. Транспортной ситуации на других перекрёстках по связанным направлениям движения. На основании этого блок производит расчет времени, на которое агент может заблокировать общий ресурс для проезда транспортных средств и производит отсчет времени, после завершения этого времени формируется и отправляется событие, которое сигнализирует агенту о том, что нужно прекратить доступ транспортных средств к общему ресурсу.

Диаграмма работы блока представлена на рис. 11.

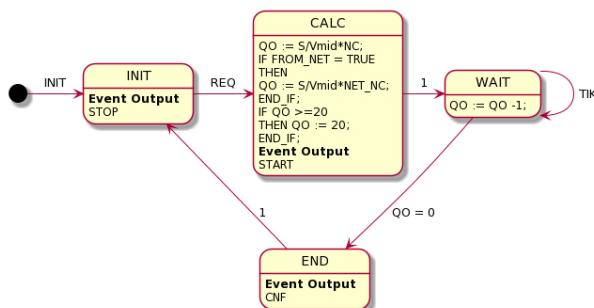


Рис. 11. «Диаграмма работы алгоритма подсчета времени»

H. Функциональный блок «IoT_compr»

Модуль системы – IoT интерфейс реализован как функциональный блок IoT_compr, изображен на рис. 12.

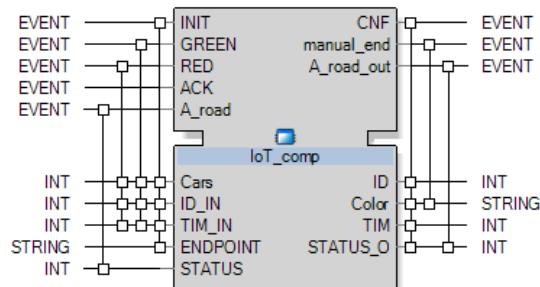


Рис. 12. «Функциональный блок IoT_compr»

Модуль реализует взаимодействие агентов с внешней средой, потребителем информации. Это может быть веб приложение, различные городские службы или центр управления дорожным движением с которым обеспечивается обмен данными.

От центра управления движением могут поступать запросы на прекращение режима автоматической работы и переход на ручное управление с заданными циклами работы светофорной сигнализации для агентов перекрестка и с заданной информацией для информирования участников движения, для агентов УДС.

От агентов в центр управления движением может передаваться полная информация о транспортной ситуации на подконтрольном участке дорожной сети, текущее состояние агента и его параметры.

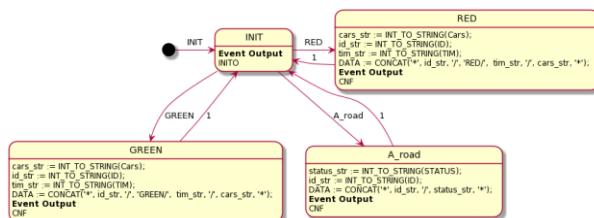


Рис. 13. «Диаграмма работы IoT_compr»

На рис. 13 изображен алгоритм работы модуля IoT. В зависимости от поступивших событий и данных модуль отправляет информацию потребителям через канал связи который реализуется в функциональном блоке NETIO стандартном для МЭК 61499, блок изображен на рис. 14.

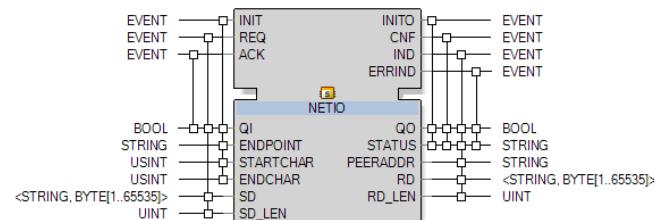


Рис. 14. Блок «NETIO»

Реализует передачу поступающих данных по протоколу TCP, на заранее определенный адрес в сети, данные передаются и поступают в виде набора символов который преобразуется функциональным блоком split_data, изображен на рис. 15.

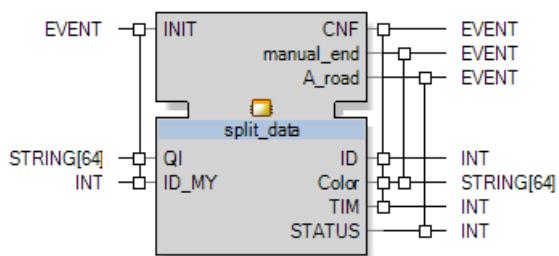


Рис. 15. Функциональный блок «split_data»

Преобразует данные из строки в различные типы по определенному алгоритму, анализируя символы, содержащиеся в принятой строке. Алгоритм работы представлен на рис. 16.

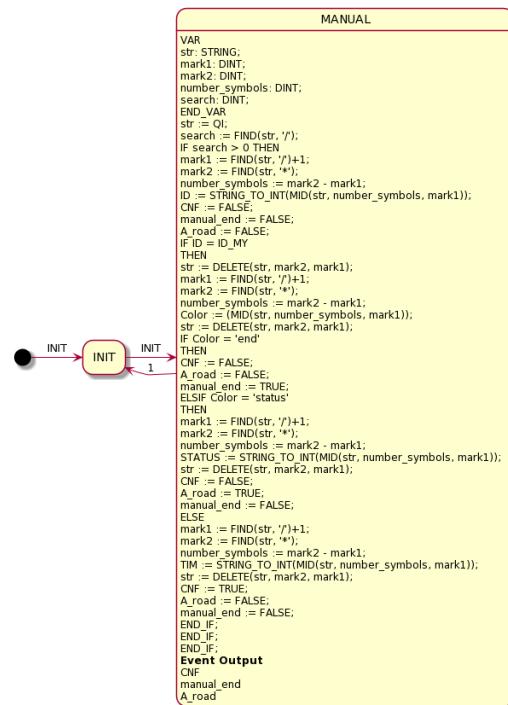


Рис. 16. Алгоритм работы блока «split_data»

На рис. 17 представлена реализация алгоритма работы ручного управления агентом перекрестка на основании полученных данных от модуля IoT.

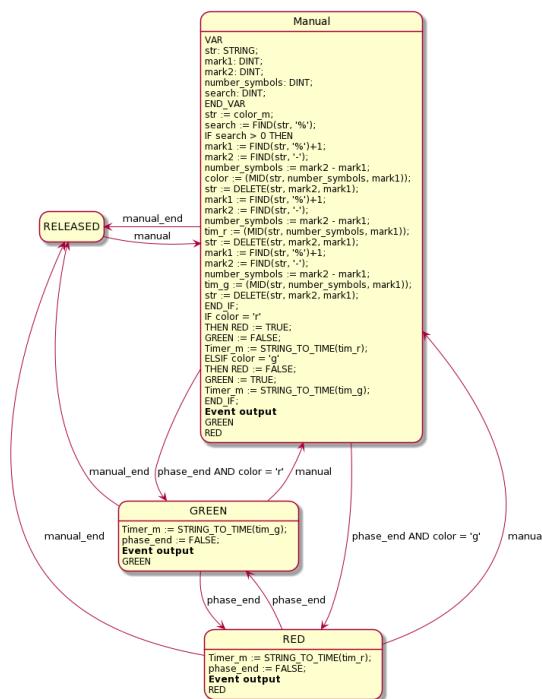


Рис. 17. Алгоритм работы агента перекрёстка в режиме ручного управления

Функцию формирования управляющих воздействий вне транспортных пересечений реализует второй тип агентов – агенты улично-дорожной сети.

III. АГЕНТ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

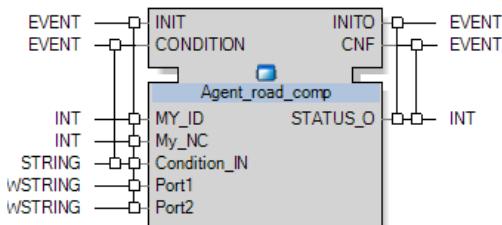


Рис. 18. Агент УДС

Агент улично-дорожной сети, который изображен на рис. 18, формирует управляющие воздействия на транспортный поток в зависимости от поступающей информации от агентов перекрёстка, дорожной ситуации, или команд ручного управления.

Входные события:

INIT инициализируется для запуска работы.

CONDITION инициализируется для получения данных о состоянии дорожного полотна.

Входные данные:

MY_ID – ID агента.

MY_NC – количество.

Condition_IN – состояние дорожного полотна.

Port1 и Port2 – адрес и порт для работы с интерфейсом.

Выходные события:

INITO инициализируется при запуске работы агента.

CNF инициализируется при получении установленного состояния.

Выходные данные:

STATUS_O – информация о текущем статусе.

Состоит из функциональных блоков Agent_road, SUBSCRIBE, PUBLISH, A_jun_road_comm и IoT_comp которые реализуют модули: «Интерфейс взаимодействия с агентами» «Алгоритм взаимодействия с агентами перекрёстка», «Алгоритм взаимодействия с агентами УДС», «Алгоритм управления ОДИ», «IoT интерфейс».

A. Функциональный блок «Agent_road»

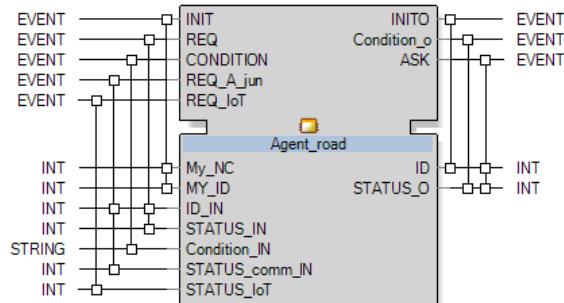


Рис. 19. Блок Agent_road

Функциональный блок Agent_road, который изображен на рис. 19, реализует алгоритмы работы агента улично-дорожной сети как самостоятельной единицы и взаимосвязь агента с другими агентами УДС.

Агент может работать в качестве знака переменной информации и выводить информацию об ограничении скорости движения в зависимости от состояния дорожного полотна. Также информацию для участников дорожного движения можно выводить в режиме ручного управления через модуль IoT.

В зависимости от расположения агента на дорожной сети осуществляется передача данных о состоянии в данный момент. Агенты, находящиеся раньше по траектории движения транспорта изменяют выходную информацию для участников дорожного движения в зависимости от принятого состояния.

B. Интерфейс взаимодействия с агентами перекрёстка

Модуль интерфейс взаимодействия с агентами перекрёстка реализован в блоке «A_jun_road_comm» который рассматривался ранее. Алгоритм работы блока со стороны взаимодействия агентов УДС с агентами перекрёстка представлен на рис. 20. Агент УДС может ограничивать скорость транспортного потока в зависимости от загруженности участка дорожной сети, который контролируется агентом перекрёстка при поступлении соответствующего входного события.

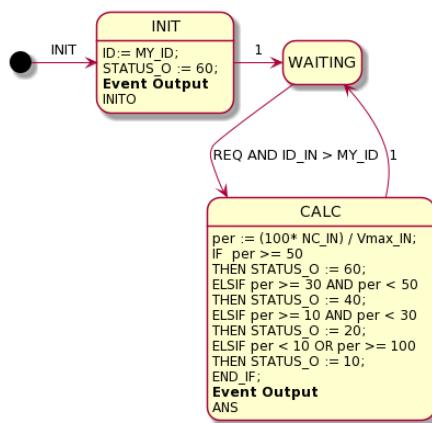


Рис. 20. Алгоритм взаимодействия с агентами перекрёстка

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрена реализация основных модулей распределенной системы для управления транспортными потоками в рамках стандарта МЭК 61499.

Из представленных в работе функциональных блоков можно собрать распределенную систему для управления транспортом для необходимого участка улично-дорож-

ной сети в достаточно короткий срок. Это могло бы ускорить развитие распределенных систем управления и улучшить транспортную инфраструктуру в небольших городах и районах.

В ходе дальнейшей работы планируется тестирование системы разработанной в рамках стандарта МЭК 61499 на имитационной модели участка дорожной сети с оценкой эффективности применения предлагаемого метода по сравнению с другими наиболее применяемыми на данный момент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lewis R. Modelling control systems using IEC 61499: Applying function blocks to distributed systems. – Iet, 2001. – No. 59.
2. Zoitl A. et al. The past, present, and future of IEC 61499 // International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 1-14.
3. Vyatkin V. The IEC 61499 standard and its semantics //IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2009. – Vol. 3, No. 4. – P. 40-48.
4. Елькин Д.М., Вяткин В.В. Подход к управлению транспортными потоками на основе стандарта МЭК 61499 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5 (215).

Распознавание и классификация жестов знакового языка глухонемых людей с использованием нейросетевых технологий

Битюцкая Наталья Ивановна

Пятигорский институт (филиал)

Северо-Кавказского федерального университета

Пятигорск, Россия

nibitutckaia@ncfu.ru

Битюцкий Андрей Олегович

Институт информационных технологий и компьютерных наук

Московский институт стали и сплавов

Москва, Россия

appofill@gmail.com

Аннотация. Целью и основным результатом работы является разработка математического и программного обеспечения для распознавания и классификации жестов английского дактильного алфавита из видеопотока с применением нейронных сетей. Система осуществляет обработку видеопотока, считывание кадра и классификацию распознанного жеста. Программное обеспечение разработано с применением языка программирования Python и сопутствующих библиотек: Tensorflow, Keras, Scikit-Learn, OpenCV.

Annotation. The aim and main result of the work is to develop mathematical and software for recognizing and classifying gestures of the English dactyl alphabet from a video stream using neural networks. The system processes the video stream, reads the frame, and classifies the recognized gesture. The software is developed using the high-level Python programming language and related libraries: Tensorflow, Keras, Scikit-Learn, OpenCV.

Ключевые слова: дактильный алфавит, классификация, сверточные нейронные сети, трансферное обучение.

Keywords: dactyl alphabet, classification, convolutional neural networks, transfer learning.

I. ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) в мире около 5% человек имеют серьезные проблемы со слухом. В качестве средств общения такие люди используют язык жестов. Проблемы глухонемых людей не остаются без внимания, по всему миру проводятся исследования, направленные на создание автоматизированного ПО, способного распознавать язык жестов и преобразовывать полученные данные в текст или голос. По информации ТАСС ученые из Новосибирского государственного технического университета планируют к 2021 году создать систему компьютерного распознавания российского и индийского языка жестов [1].

В самом простом случае в качестве жестов используется дактильный алфавит. Дактильный алфавит представляет собой совокупность пальцевых знаков, расположенных в определенном порядке. Каждый дактильный знак (дактилема) обозначает определенную букву, и в национальных дактильных алфавитах столько дактилем, сколько букв в алфавите того или иного языка (рис. 1). Такой алфавит является частью жестового языка и, как правило, используеться для произнесения имен собственных или географических названий, а также специфичных терминов. Несмотря на это, создание систем распознавания и классификации такого алфавита значительно облегчит взаимодействие глухонемых людей с остальным миром.



Рис. 1. Английский дактильный алфавит

В настоящее время активно применяются алгоритмы для распознавания различных видов жестов, использующие специфичные видеокамеры, данные с дальномера (технологии Microsoft Kinect и Asus Xtion), а также различного рода контактные датчики. Использование таких систем трудоемко и непригодно для повседневной жизни. Более подходящим решением, на наш взгляд, является использование фронтальной камеры смартфона или веб-камеры ноутбука.

Целью данной работы является создание математического и программного обеспечения для распознавания и классификации дактильного алфавита с использованием камеры мобильного устройства.

Для достижения поставленной цели требуется: провести анализ существующих решений, собрать большое количество необходимых для обучения данных (фотографий различных жестов), провести предобработку изображений, разработать алгоритм классификации и сравнить его с уже известными.

Из 26 жестов, представленных в английском дактильном алфавите, только 24 являются статическими, именно на них будет сосредоточено построение модели классификации. Задача осложняется необходимостью добиться хорошей точности классификации из-за похожести некоторых жестов. Вдобавок, возникают трудности со скоростью распознавания из-за быстрой смены объектов в кадре.

II. ТИПЫ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ЖЕСТОВ

Задача классификации жестов, как таковая, представляет собой в общем случае задачу классификации изображений. Каждому жесту, в нашем случае 24 статическим жестам дактильного алфавита, соответствует его собственный класс, вероятность распознавания которого авторы и хотели бы получить как результат работы системы.

Классификация изображений – это задача преобразования входного изображения в соответствующий данному изображению класс или вероятностное распределение классов. Наиболее эффективным инструментом распознавания объектов на изображении, по мнению академического сообщества и крупнейших технологических компаний, признаны нейронные сети.

Рассмотрим основные концепции и типы нейронных сетей.

A. Полносвязные нейронные сети

Fully Connected Feed-Forward Neural Networks (FNN) – полносвязные нейросети прямого распространения. Из определения FNN следует, что данная модель сети использует один персептрон для каждого входного сигнала (например, пиксель в изображении), что приводит к быстрому росту количества весов для больших изображений [2]. Каждый узел связан с каждым другим узлом в следующем и предыдущем слое, образуя очень плотную (fully-connected) сеть, что приводит к избыточности и неэффективности, а также усложняет процесс обучения, так как полно связной сети нужно огромное количество тренировочных данных для обучения всех весов.

Другая распространенная проблема заключается в том, что когда изображение преобразуется в линейную цепочку байт, мы теряем его топологию, т.е. взаимосвязь между отдельными его частями. Кроме того, задача распознавания подразумевает умение нейронной сети извлекать из входных данных инварианты, так как зачастую данные могут отличаться от эталонных.

Все эти аспекты приводят к выводу, что использование обычной полно связной нейронной сети не эффективно для решения задачи классификации изображений в видеопотоке. В свою очередь, сверточные нейронные сети решают все вышеперечисленные проблемы.

B. Сверточные нейронные сети

Convolutional Neuronal Network (CNN) – это специальный вид нейронной сети для обработки данных с сеточной топологией [3]. В контексте нашей задачи можно представить изображение как двумерную сетку пикселей. Сверточные сети широко применяются в практических приложениях, в том числе при решении задач классификации, распознавания и сегментации изображений.

Своим названием сверточные нейронные сети обязаны использованию математической операции свертки. В самом общем виде свертка – это операция над двумя функциями вещественного аргумента:

$$s(t) = (x * \omega)(t), \quad (1)$$

где первый аргумент x – вход, второй ω – ядро, t – момент времени. Выход $s(t)$ иногда называют картой признаков [4].

В приложениях машинного обучения входом, как правило, является многомерный массив данных, а ядром – многомерный массив параметров, адаптированных алгоритмом обучения. Будем называть эти массивы тензорами. Поскольку каждый элемент входа и ядра должен храниться отдельно в явном виде, зачастую предполагается, что эти функции равны нулю всюду, кроме конечного множества точек, для которых мы храним значения. На практике это означает, что сумму от минус до плюс бесконечности можно заменить суммированием по конечному числу элементов массива (рис. 2):

$$s(t) = (x * \omega)(t) = \sum_m \sum_n I(i + m, j + n) K(m, n), \quad (2)$$

где S – карта признаков, i и j – размерность фильтра, I – входной тензор, K – матричный фильтр, m и n – размерность тензора.

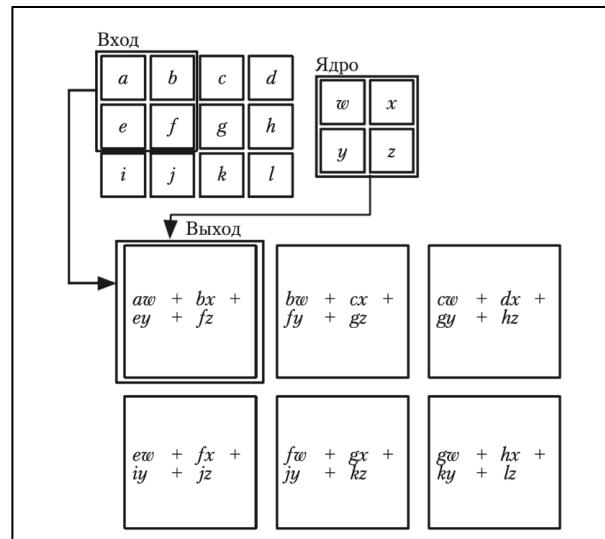


Рис. 2. Пример свертки

Со сверткой связаны три важные идеи, которые помогают улучшить систему машинного обучения: разреженные взаимодействия, разделение параметров и инвариантность представления.

В сверточных сетях взаимодействия чаще всего разреженные. Достигается это за счет того, что размерность ядра меньше размерности входа. Например, входное изображение может содержать огромное количество пикселей, но значимых признаков будет в разы меньше. Следовательно, нужно хранить меньше параметров, а это снижает количество потребляемой моделью памяти и повышает ее статистическую эффективность. Кроме того, для вычисления выхода потребуется меньше операций. Если у модели m входов и n выходов, то при применении FNN нужно $m * n$ параметров со сложностью практически используемых алгоритмов – $O(m * n)$.

Если ограничить число соединений с каждым выходом величиной k , то потребуется только $k * n$ параметров, и сложность составит $O(k * n)$, где k на порядок меньше, чем m [4].

Под разделением параметров понимают, что один и тот же параметр используется в нескольких функциях модели. В традиционной нейронной сети (FNN) каждый элемент матрицы весов используется ровно один раз при вычислении выхода слоя. Под разделением параметров стоит понимать наличие в сети связанных весов, поскольку значение веса, примененного к одному входу, связано со значением веса, примененного где-то еще. В сверточной нейронной сети каждый элемент ядра применяется к каждой позиции входа. Разделение параметров означает, что вместо обучения отдельного набора параметров для каждой точки мы должны обучить только один набор. Следовательно, в каждом слое нашей сети обучению будет подвергаться меньшее количество параметров [4].

В сверточных нейронных сетях инвариантность достигается путем внедрения в архитектуру модели специальной функции – пулинга, которая модифицирует данные выходного слоя. Функция пулинга заменяет выход сети в некоторой точке сводной статистикой близлежащих выходов. Например, операция max -пулинга [5] возвращает максимальный выход в прямоугольной окрестности. Так же применяются: усреднение по прямоугольной окрестности и L_2 -норма в прямоугольной окрестности. В любом случае, пулинг позволяет сделать представление приблизительно инвариантным относительно малых параллельных переносов входа [4].

В подтверждение вышесказанного можно привести пример из книги Я. Гудфеллоу [4]. Рассматривается метод для обнаружения границ изображения размером 320×280 . К изображению применяется свертка с ядром 2×2 , она требует $319 \times 280 \times 3 = 267\,960$ операций с плавающей точкой. Если то же самое преобразование выполнять путем перемножения матриц, то потребуется $320 \times 280 \times 319 \times 280 \approx 8$ миллиардов операций. При прямом перемножении матриц пришлось бы выполнить выше 16 миллиардов операций с плавающей точкой, так что и с этой точки зрения свертка примерно в 60 000 раз эффективнее. Можно сделать вывод, что свертка – чрезвычайно эффективный способ описания преобразований, в которых одно и то же линейное преобразование многократно применяется к небольшим участкам изображения.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что CNN лучше подходят для решения задачи распознавания жестов.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

A. Содержательная постановка задачи

Требуется создать систему распознавания и классификации знакового языка жестов в видеопотоке с использованием веб-камеры компьютера или смартфона. Данная система должна соответствовать основным двум критериям: точность распознавания показываемых в камеру жестов и скорость их распознавания. На вход в систему подается необработанный видеопоток, кадры которого представляют собой статические изображения

размерности $m \times n$, где m и n – ширина и высота записывающего видео окна. Разработанная система должна поддерживать работу в браузерах для наиболее полного охвата пользователей.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- исследовать известные методы и алгоритмы распознавания и классификации изображений;
- разработать программное обеспечение, позволяющее производить корректное распознавание жестов знакового языка глухонемых людей, с дальнейшим преобразованием данных о жесте в текстовую информацию;
- протестировать разработанное программное обеспечение, определить метрики качества для оценки системы, сравнить полученные результаты с существующими решениями, используемыми для распознавания и классификации жестов.

B. Математическая постановка задачи

Пусть имеется видеопоток $V = \{I_n\}_{n=0}^N$, где $I \in \mathbb{R}^{w \times h \times c}$ – очередной кадр размером $w \times h \times c$, где w – ширина изображения в пикселях, h – высота изображения в пикселях, а c – количество цветовых каналов в модели RGB. Индекс $n \in [0, N]$ обозначает номер дискретного момента времени. Таким образом,

$$I = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1w} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2w} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{h1} & a_{h2} & \cdots & a_{hw} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Каждый элемент a_{ij} кадра I представляет собой c -компонентный цветовой вектор:

$$a_{ij} = (r(a_{ij}), g(a_{ij}), b(a_{ij})). \quad (4)$$

Множество всех возможных видеорядов обозначим через V^* . Рассмотрим множество $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k\}$, элементами которого являются знаковые жесты дактильного алфавита.

Обозначим через $T^* = \bigcup_{k=1}^{+\infty} T^k$ – пространство слов различной длины над алфавитом T . При этом слова на дактильном алфавите будем обозначать символами $w \in T^*$. Будем говорить, что слово w осмысленное, если $\varphi(w) \in \mathcal{D}$; здесь функция φ преобразует символы дактильного алфавита в соответствующие буквы английского алфавита, а \mathcal{D} – множество (словарь) английских слов.

Таким образом, требуется построить алгоритм $f(V)$:

$$f(V): V^* \rightarrow T^* \quad (5)$$

распознавания слов и фраз $w = f(V)$ на языке жестов по заданному входному видеоряду V .

Для построения алгоритма f необходимо создать обучающую выборку $X = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$, каждому элементу которой будет поставлен в соответствие элемент множества $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$, где m – размерность обучающей выборки, а k – количество определенных в системе классов. Полученное множество разделяется на два непересекающихся подмножества $(X_{\text{train}}, Y_{\text{train}})$ и $(X_{\text{test}}, Y_{\text{test}})$. Каждому элементу x_j , принадлежащему X_{train} или X_{test} , сопоставлен элемент Y_{train} или Y_{test} соответственно, от-

нося его к y_j – my классу. Первое подмножество $\langle X_{train}, Y_{train} \rangle$ используется для обучения модели, второе $\langle X_{test}, Y_{test} \rangle$ — для оценки качества обучения созданной нейронной сети.

В качестве метрик качества используется матрица не точностей (confusion matrix), и на ее основе вычисляется F1–мера:

$$F1 = 2 * \frac{p(f, X) * r(f, X)}{p(f, X) + r(f, X)} \quad (6)$$

где p и r – функции, определяющие точность и полноту классификации данных соответственно, X – обучающая выборка.

Необходимо, чтобы построенный алгоритм классификации f максимизировал метрику качества $F1$:

IV. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

A. Основные этапы решения задачи

Решение поставленной задачи включает в себя следующие этапы:

- сбор данных для обучения нейронной модели;
- препроцессинг данных;
- обучение модели;
- тестирование модели;
- извлечение кадра из входящего видеопотока;
- классификация жеста.

Рассмотрим подробнее каждый из данных этапов.

Был использован датасет MNIST American Sign Language [5]. Необходимо увеличить объем данных для улучшения разрозненности данных, соответствующих одному классу, и повышения точности распознавания модели.

На этапе препроцессинга, в первую очередь, использован метод data augmentation, благодаря которому значительно расширился используемый набор данных, а также улучшилась инвариантность классификации. Помимо этого, проведена нормализация значений входного тензора.

Используемая в системе модель является предобученной. Ее дообучение строится на принципах трансферного обучения, в котором большая часть высокогоуровневых весовых коэффициентов модели сохраняет свои значения, что значительно ускоряет время обучения.

Тестирование модели происходит с использованием заранее подготовленного сэмпла тестовых данных. Результаты тестирования оцениваются метриками качества и данными, полученными из confusion matrix, в частности, $F1$ мерой.

Извлечение кадра из видеопотока необходимо для классификации, потому что система умеет работать только со статическими данными. Частота извлечения является регулируемым параметром, тонкая настройка которого должна увеличить скорость работы системы.

Классификация представляет собой базовую работу нейросетевого алгоритма: на вход модели подается изображение, прошедшее предобработку, на выходе из модели мы получаем распределение вероятностей принадлежности объекта к каждому классу, определенному в нейронной сети.

B. Подготовка обучающей и тестовой выборки

Для корректной работы системы распознавания необходимо подготовить обучающую и тестовую выборку данных.

Использованный в работе датасет MNIST American Sign Language состоит из 24 классов, каждый из которых представляет собой соответствующий жест дактильного алфавита. Датасет состоит из 21455 тестовых изображений и 7172 тренировочных изображений размером $28 \times 28 \times 1$.

Изображения в чистом виде неприемлемы для использования внутри нейронных сетей. Для нормализации данных необходимо провести несколько этапов препроцессинга.

В первую очередь применяется метод увеличения данных – аугментации (data augmentation). Данный метод предназначен для увеличения элементов обучающей выборки путем применения случайных (но реалистичных) преобразований, таких как увеличение (7), смещение (8), поворот (9), аффинные преобразования (10), изменение оттенков изображения, а также наложения различных эффектов:

$$\begin{aligned} x' &= x * S_x \\ y' &= y * S_y \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x' &= x * \cos \theta - y * \sin \theta \\ y' &= x * \sin \theta + y * \cos \theta \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x' &= a_1x + a_2y + a_3 \\ y' &= b_1x + b_2y + b_3 \end{aligned} \quad (10)$$

где $[x, y]$ – исходное изображение, $[x', y']$ – новое изображение, S_x, S_y – коэффициенты увеличения, $\Delta x, \Delta y$ – коэффициенты смещения, θ – угол поворота, a_1, a_2, b_1, b_2 – коэффициенты поворота, a_3, b_3 – коэффициенты смещения.

В результате применения данного метода на выходе вместо одного изображения $x_i \in X$ можно получить z изображений (рис. 3), где z – количество использованных преобразований.

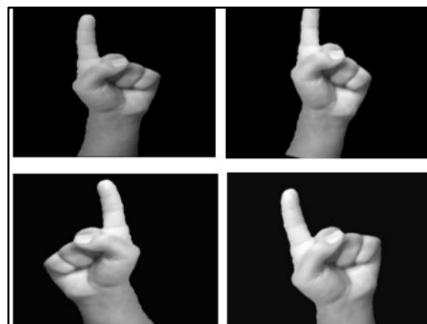


Рис. 3. Результат применения data augmentation метода

В результате работы размер обучающей выборки увеличится до $X * z$, таким образом, для каждого класса жестов будет большее количество тренировочных изображений, что значительно улучшит точность работы нейронной сети.

Следующий этап препроцессинга – нормализация данных. Значения пикселей изображения находятся в диапазоне [0, 255]. Для корректной работы нейронной сети необходимо нормализовать их – привести значения к диапазону [0, 1].

Для этого применяется конвертация по формуле:

$$N = \frac{P}{P_{\max}}, \quad (11)$$

где N – значение пикселя после нормализации, P – значение пикселя до нормализации, P_{\max} – максимальное значение пикселя.

В результате препроцессинга мы имеем увеличенное количество элементов в выборках, данные в которых нормализованы.

C. Описание алгоритма решения задачи

Разработан алгоритм обработки видеопотока, кадры которого отправляются на вход классификатора – нейронной сети для определения класса жеста, показываемого в кадре. Алгоритм состоит из 2-х основных частей: обучения сверточной нейронной сети и классификации кадров из видеопотока.

Первым этапом работы алгоритма является обучение нейронной сети [6]. Данная сеть была обучена на датасете [5]. Набор данных был расширен с помощью методов аугментации: афинных преобразований, сдвигов вдоль осей x, y, рандомного кропа изображения, отражения, добавления шумов. Данные методы были реализованы с помощью библиотеки tensorflow.keras [7].

Используемая сверточная нейронная сеть является предобученной, и ее дообучение произведено с использованием методов трансферного обучения. Были взяты все слои сети MobileNet, отброшен последний, отвечающий за классификацию первоначальных классов, и добавлены 4 слоя: GlobalAveragePooling2D, Dense 512, Dropout, Dense 24. Полученная архитектура сети представлена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. АРХИТЕКТУРА ПОСТРОЕННОЙ СЕТИ

Размерность входа	Тип слоя	t	c	n	s
$224^2 \times 3$	conv2d	–	32	1	2
$112^2 \times 32$	bottleneck	1	16	1	1
$112^2 \times 16$	bottleneck	6	24	2	2
$56^2 \times 24$	bottleneck	6	32	3	2
$28^2 \times 32$	bottleneck	6	64	4	2
$14^2 \times 64$	bottleneck	6	96	3	1
$14^2 \times 96$	bottleneck	6	160	3	2
$7^2 \times 160$	bottleneck	6	320	1	1
$7^2 \times 320$	conv2d 1 x 1	–	1280	1	1
$7^2 \times 1280$	avgpool 7 x 7	–	–	1	–
$1 \times 1 \times 1280$	globavgpool	–	–	1	–
$1 \times 1 \times 1280$	dense	–	512	1	–
$1 \times 1 \times 512$	dropout	–	512	1	–
$1 \times 1 \times 512$	dense	–	24	1	–

Благодаря блокам GlobalAveragePooling2D и Dropout уменьшается вероятность переобучения модели. Последний слой имеет под собой активационную функцию softmax на 24 класса.

Благодаря данному способу обучения используемая модель сохраняет данные, полученные из датасета ImageNet, на котором она была предобучена, а также учится распознавать новые классы – жесты дактильного алфавита.

Для непосредственной классификации кадр изображения проводится через все слои нейронной сети MobileNetV2, в каждом из которых выделяются характерные признаки, необходимые для определения принадлежности изображения к тому или иному классу. На финальном этапе при помощи активационной функции на выходе получаем массив из 24-х чисел, каждое из которых – вероятность принадлежности жеста к тому или иному классу.

Полученная обученная модель сохраняется и в дальнейшем используется для распознавания жестов из кадров видеопотока.

Вторым этапом необходимо инициализировать запуск видеопотока, а также определить область интереса – кадр из этой области, который, пройдя предобработку, попадет на вход нашей сети.

Запись видео производится посредством технологии opencv. Область интереса на текущий момент представляет собой статическую область в нижней левой части видео. Область выделена зелеными границами. Она необходима для снижения вероятности попадания в кадр лишних объектов.

D. Разработанное программное обеспечение

Разработанная программа состоит из 6 классов: SignDataset, VideoCapture, ConvolutionalNeurollNetwork, Frame, Metrics, Classification. Основной функционал прописан в классах ConvolutionalNeurollNetwork и Classification. Класс ConvolutionalNeurollNetwork описывает работу сверточной нейронной сети: метод buildModel отвечает за конфигурацию, метод fitModel – за обучение, метод prediction – за тестирование. Класс Classification, используя класс VideoCapture, запускает основной цикл программы – видеопоток, получаемый из функции captureVideo, кадры которого идут на вход обученной сети, полученной по результатам отработки кода класса ConvolutionalNeurollNetwork.

Программное обеспечение разработано посредством языка программирования Python и сопутствующих библиотек: Tensorflow v2.4, Keras, Pandas, Scikit-Learn, OpenCV. Обучение сети происходило при помощи библиотеки Tensorflow и Keras, метрики для проверки качества обучения взяты из библиотеки Scikit-Learn, видеопоток инициализируется средствами OpenCV.

Интерфейс программы представлен на рис. 4 в виде видео-окна, отображающего зону детекции, на которой выводится классифицированный жест.

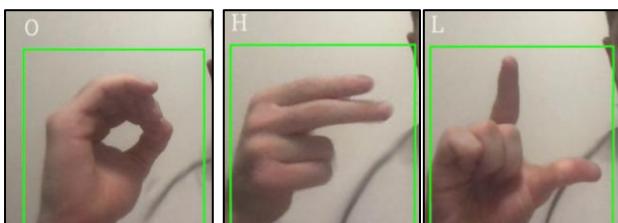


Рис. 4. Интерфейс программы

E. Результаты работы программы

В качестве метрик оценки работоспособности программы взяты метрики по оценке качества обучения нейронной сети, а также графики истории обучения модели.

Выбраны два графика функции: график функции accuracy и график функции потерь. Функция accuracy описана выше. В качестве функция потерь для нашей задачи выбрана категориальная кросс-энтропия [8], являющаяся применением кросс-энтропии к активационной функции softmax.

$$\text{loss} = -\sum_i^C t_i * \log(f(s_i)), \quad (12)$$

где loss – итоговое значение функции потерь, C – количество классов изображений, $f(s_i)$ – активационная функция softmax, s_i – предсказанная сетью метка класса для объекта i, t_i – истинная метка класса объекта i.

Полученные графики представлены на рис. 5.

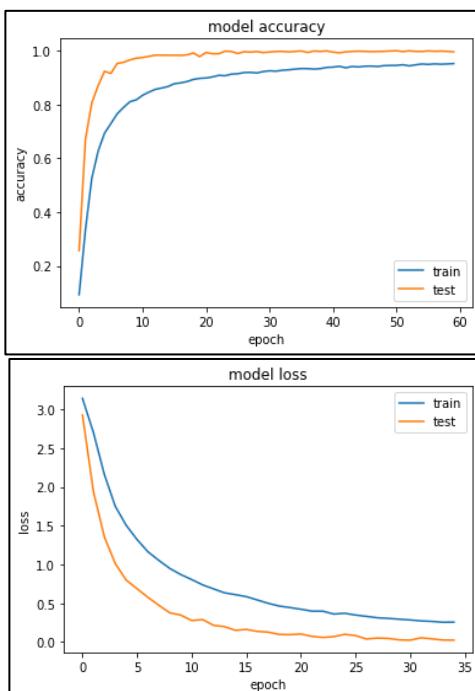


Рис. 5. Графики обучения модели

По характеру данных графиков можно сделать выводы, что обучение за 60 эпох достигло хорошего уровня качества.

Для задач классификации основным механизмом оценки качества является матрица неточностей, на полученных из нее данных строятся основные метрики: accuracy, f1, precision, recall. По данной матрице можно

сделать вывод, что наша сеть обучилась достаточно хорошо для решения поставленной задачи. Вычисленные значения представлены построчно для каждого из 24 классов, соответственно относящихся к каждому жесту из дактильного алфавита.

По данным из матрицы были вычислены метрики f1 и accurasy, выбранные в качестве основных для оценки работы данной системы (рис. 6).

	precision	recall	f1-score	support
0	0.71	1.00	0.83	331
1	1.00	0.90	0.95	432
2	0.88	0.99	0.93	310
3	0.79	0.79	0.79	245
4	0.89	0.89	0.89	498
5	0.79	1.00	0.88	247
6	1.00	0.82	0.90	348
7	1.00	0.77	0.87	436
8	1.00	0.65	0.78	288
9	1.00	0.79	0.88	332
10	1.00	0.58	0.73	331
11	0.79	1.00	0.88	209
12	0.90	0.92	0.91	394
13	0.76	0.99	0.86	291
14	0.74	1.00	0.85	246
15	1.00	0.81	0.89	347
16	0.71	0.99	0.83	164
17	1.00	0.31	0.48	144
18	0.46	1.00	0.63	246
19	0.91	0.77	0.83	248
20	1.00	0.59	0.74	266
21	1.00	0.71	0.83	346
22	1.00	0.85	0.92	206
23	0.67	1.00	0.80	267
accuracy			0.84	7172
macro avg	0.88	0.84	0.83	7172
weighted avg	0.89	0.84	0.84	7172

Рис. 6. Метрики

По данным метрикам можно сделать вывод, что модель в 84% случаев делала верные представления, что является очень высокой метрикой. Используемая модель MobileNet на датасете ImageNet имела метрику top-1 accuracy 0.7, что значительно меньше полученной нами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Информационное агентство России «ТАСС» // Наука «ТАСС». 2021. – URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/7259055> (дата обращения 21.03.2021).
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series). Massachusetts.: The MIT Press, 2016. – P. 150-152.
- LeCun Y., Bengio Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series. // The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. – 1995. – P. 5-8.
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series). Massachusetts.: The MIT Press, 2016. – P. 282-315.
- American Sign Language dataset from MNIST. – URL: <https://www.kaggle.com/datamunge/sign-language-mnist> (дата обращения 21.03.2021).
- Mark Sandler, Andrew G. Howard, Menglong Zhu, Andrey Zhmoginov, and Liang-Chieh Chen. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. mobile networks for classification, detection and segmentation // CoRR. – 2018. – No. 34.
- Документация библиотеки препроцессинга. Документация keras. – URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras (дата обращения 21.03.2021).
- Howard A., Sandler M., Chu G., Chen L., Chen B., Tan M. Searching for MobileNetV3 // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019.

Специализированные алгоритмы интеллектуального анализа и развертывания БД системы охраны периметра

Самойлов Алексей Николаевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
asamoylov@sfedu.ru

Аннотация. Целью исследования в данной статье является разработка специализированных алгоритмов интеллектуального анализа архитектуры распределенной базы данных системы охраны периметра с высокими требованиями к масштабируемости и отказоустойчивости. Предметная база данных на основе СУБД Oracle Database Enterprise Edition является хранилищем данных приложения Oracle Retail. В ходе работы были показаны алгоритмы анализа и развертывания БД системы.

Annotation. The purpose of the research in this article is to develop specialized algorithms for intelligent analysis of the architecture of a distributed database of a perimeter security system with high requirements for scalability and fault tolerance. The subject database based on the Oracle Database Enterprise Edition is the data warehouse of the Oracle Retail application. In the course of the work, the algorithms for the analysis and deployment of the database system were shown.

Ключевые слова: база данных, высокая доступность, отказоустойчивость, масштабируемость, анализ производительности, ресурсное планирование.

Keywords: database, high availability, fault tolerance, scalability, performance analysis, resource planning.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для целей охраны периметра производственного объекта большой территориальной протяженности с учетом вероятного наличия угроз несанкционированного физического проникновения, на территории которого находятся стационарные или подвижные объекты, требуется использование необитаемых интеллектуальных взаимодействующих мобильных роботизированных платформ.

Для обеспечения охраны протяженного периметра необходимо решить ряд задач, в том числе:

- Исследование архитектуры и возможностей выбранной платформы для обеспечения высокой производительности, масштабируемости и высокой доступности.
- Исследование существующей информационной системы охраны периметра, представленной ранее в работах [1-10]. На практике процесс внедрения каких-либо систем с нуля является сравнительно редким случаем. По этой причине, исследование модернизируемой системы, как в плане конфигу-

Костюк Андрей Иванович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
aikostyuk@sfedu.ru

рации, так и в плане производительности, является необходимым шагом к построению новой архитектуры. Важными подзадачами в рамках данного исследования является сбор и анализ требований к новой, модернизированной системе.

- Проведение ресурсного планирования. Поскольку состояние информационных систем не является статичным, исследование должно включать анализ изменения параметров системы за продолжительный промежуток времени. Кроме того, решение задачи по разработке архитектуры требует знаний о планируемом состоянии системы в будущем.

Обобщенная архитектура системы приведена на рис. 1.

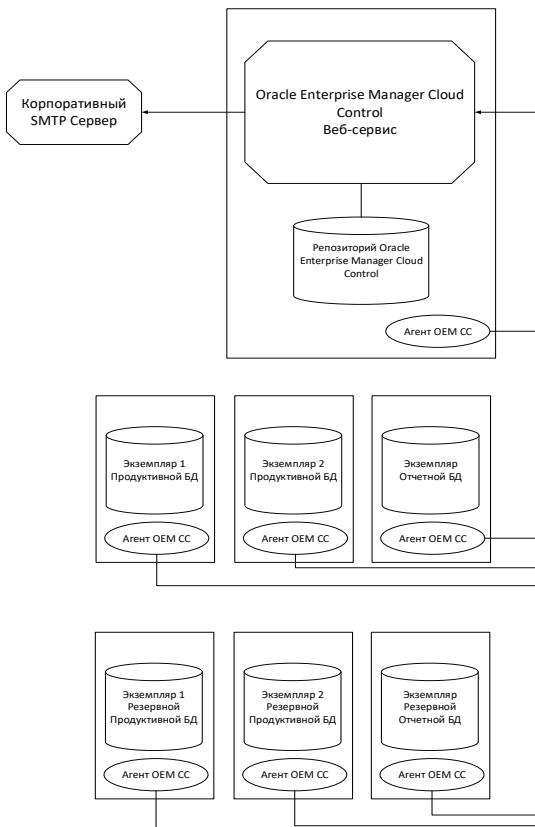


Рис. 1. Обобщенная архитектура системы

II. АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И МАСШТАБИРУЕМОСТИ

Масштабируемость – это возможность системы справляться с возрастающей нагрузкой. Для того, чтобы предметно говорить о масштабируемости системы, необходимо владеть информацией о производительности данной системы, с математической точки зрения выражющейся в метриках производительности.

Эффективное управление информационной системой сложно представить без мониторинга и управления производительностью (Performance Management). Основной проблемой производительности является сложность ее оценки.

Метрики – это параметры, по которым оценивается производительность. Их можно разделить на бизнес-метрики и технические метрики.

Одни задаются бизнесом как критерии безошибочной работы информационной системы, вторые определяются аппаратными и программными средствами.

В задаче оптимизации производительности СУБД важны технические метрики. В их числе:

- загрузка CPU;
- время загрузки приложения;
- время отклика на запрос;
- время записи информации на диск;
- число операций ввода-вывода в единицу времени;
- число взаимоблокировок при блокировании записей БД;
- число транзакций в единицу времени.

Необходимо определиться, какую метрику выбрать для измерений в данной конкретной системе.

Процесс мониторинга производительности заключается в сборе различных показателей производительности со всевозможных компонентов инфраструктуры (серверы, приложения, сетевое оборудование и др.). Измерения нужно производить в течение определенного промежутка времени, длительность этого промежутка не стандартизована, но обычно измерения проводят в течение месяца в дневное время, когда наблюдается пиковая нагрузка. В действительности очень редко имеется возможность производить измерения в течение месяца. Затем нужно сравнить текущее состояние и производительность базовых компонентов с рекомендуемыми значениями (базовым уровнем).

Если измеренные метрики производительности не удовлетворяют рекомендованным значениям, возникает задача коррекции данных показателей и возвращения их значений к базовым. Основной способ коррекции — правильное физическое проектирование. [6]

Возвращаясь к собственно масштабируемости, важно отметить, что для сохранения стабильности работы системы и обеспечения быстрого доступа к данным в разное время система базы данных должна хорошо масштабироваться.

Существует два общих подхода к масштабированию информационных систем.

Вертикальное масштабирование характеризуется, в большинстве случаев покупкой нового, более мощного и, следовательно, более дорогого оборудования.

Горизонтальное масштабирование, в свою очередь, позволяет добавлять недорогие новые серверы, называемые узлами, к кластеру, который работает как единая служба в рамках одной широкополосной сети. [7].

III. НАГРУЗОЧНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ БАЗ ДАННЫХ

Нагрузочное тестирование состоит из следующих этапов: подготовительный, процесс тестирования и результаты.

Цель нагрузочного теста – выявить функциональные проблемы и проблемы производительности системы под нагрузкой. Проблемы с производительностью относятся к ситуациям, когда, например, система страдает от неожиданно высокого времени отклика или низкой пропускной способности. Результаты нагрузочного тестирования являются основным этапом тестирования. Полученные значения необходимо сравнить с требованиями к системе, и, если значения не соответствуют требованиям, необходимо провести анализ и выявить причины несоответствия. [10]

Нагрузочное тестирование может быть произведено на нескольких уровнях системной архитектуры:

- На уровне сервера и операционной системы.
- На уровне базы данных.
- На уровне сервера приложений.

Каждый из инструментов нагрузочного тестирования ориентирован на один из вышеперечисленных уровней. Немаловажно, что несмотря на то, что только тестирование нагрузки со стороны пользователей может дать представление о реальных метриках и состояниях системы, результаты данного тестирования может быть сложно интерпретировать, ввиду вложеннойности элементов информационной системы.

По этой причине важным аспектом нагрузочного тестирования является генерация представительной нагрузки для изолированных областей и компонентов информационной системы без воздействия всех архитектурных уровней, составляющих эту систему.

Рассмотрим основные доступные инструменты нагрузочного тестирования уровня базы данных. Плюсами использования данного семейства инструментов являются:

- Возможность использовать вызовы СУБД для тестирования системных ресурсов;
- Возможность использовать одну утилиту для тестирования всех основных ресурсов системы (процессор, оперативная память, подсистема ввода-вывода);
- Относительная легкость использования.

Рассмотрим несколько примеров таких приложений:

- Функция калибровки ввода-вывода Oracle Database – также известная как пакет DBMS_RESOURCE_MANAGER.CALIBRATE_IO.

Строго говоря, процедура проверяет только ресурсы физического ввода-вывода. Однако, при добавлении в процесс тестирования пакета DBMS_STATS.GATHER_SYSTEM_STATS, который генерирует нагрузку на процессор, данные пакеты могут быть использованы в качестве инструментов нагрузочного тестирования.

Самым большим недостатком данного подхода является отсутствие подробностей о том, как инструменты запускают тесты. Они также ограничены с точки зрения конфигурации. Например, нет возможности получить информацию, с какими файлами данных возникают проблемы с операциями ввода-вывода.

- Oracle Real Application Testing – это опция Enterprise Database от Oracle, которая позволяет записывать загрузку в исходной системе и проигрывать аналогичную нагрузку в среде назначения.

Несмотря на наиболее продвинутый характер данной утилиты среди приведенных, она также подвержена некоторым из проблем, описанных ранее. Стоит отметить, что продукт не является бесплатным и требует дополнительных лицензий. Данная утилита является крайне полезной при проведении проектов тестирования и миграции.

IV. СБОР И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Каждому уровню организации информационной системы присущи свои показатели и метрики, отражающие его производительность и текущее состояние. Список таких метрик довольно обширен, а потому среди них требуется выделить основные для каждого уровня (операционной системы, СУБД), подлежащие анализу.

Каждая выбранная метрика характеризуется собственным подходом и инструментарием для сбора, хранения и анализа.

На основе выбранных и собранных метрик проведем анализ производительности системы в данный момент.

- Основными областями исследования будут являться:
- Метрики, связанные с используемой вычислительной мощностью;
 - Внутренние метрики производительности СУБД.

Для получения представительной картины для последующего анализа, требуется наличие исторических данных за продолжительный период. Распространенной практикой является использование данных за 1-2 года, поскольку профиль нагрузки на систему может изменяться с течением времени, а также в зависимости от:

- времени суток,
- дня недели,
- месяца и квартала.

V. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Учитывая то, что система построена на базе UNIX-подобной системы IBM AIX, основной метрикой для анализа в данной области является значение Load Average.

Load Average – среднее значение загрузки системы за некоторый период времени, как правило, отображается в виде трех значений, которые представляют собой усред-

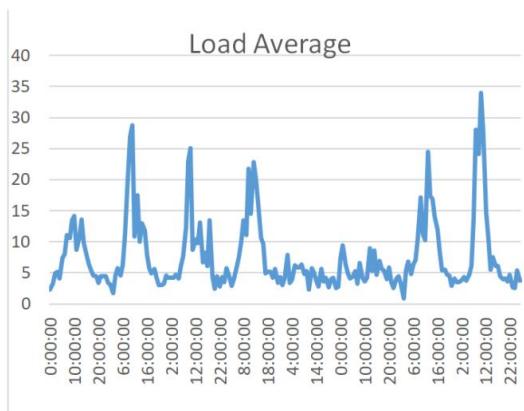
ненные величины за последние 1, 5 и 15 минут. Каждый процесс, который использует либо ждет CPU, увеличивает число загрузки на один.]

История значений данной метрики в UNIX-подобных системах обрабатывается системной утилитой sysstat. В данный пакет входит также утилита SAR (System Activity Report), предназначенная для сбора статистической информации о производительности системы.

Нагрузку на систему требуется анализировать с учетом ее семантики. К примеру, при наличии нескольких серверов СУБД, обслуживающих одно приложение, необходимо учитывать способ распределения нагрузки, динамику запросов, а также прогнозировать изменение этих параметров.

В нашем случае система работает с одним сервером СУБД, поэтому анализ производительности оборудования системы сводится к анализу метрик данного сервера.

На рис. 2 представлена история значений метрики Load Average за одну неделю.



Rис. 2. История значений метрики Load Average

Как следует из графика на рис. 2, изменения данной метрики имеют циклический характер, зависящий от времени суток и дня недели. Пиковые значения метрики достигают значения в 30, что, учитывая собранную информацию об оборудовании в наличии, показывает картину полной загрузки системы.

VI. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СУБД

СУБД Oracle предоставляет широкий спектр инструментов для сбора и анализа метрик производительности. Некоторые инструменты не входят в базовый поставляемый набор, и требуют дополнительного лицензирования.

Исходя из того, что заказчик имеет лицензию широкого покрытия PULA (Unlimited License Agreement), нам представляется возможность использовать любые доступные для СУБД Oracle Enterprise Edition инструменты сбора и анализа производительности.

Для анализа применим инструмент под названием Automatic Workload Repository (AWR). AWR генерирует снимки ключевых данных производительности, таких как статистика системы и сеанса, статистика использования сегментов, статистика временной модели и статистика максимальной нагрузки SQL, сохраняя снимки в табличном пространстве Sysaux.

По умолчанию база данных генерирует снимок (snapshot) статистики каждый час. Интервал между снимками, типы статистики, собираемой AWR, а также длительность хранения снимков в AWR поддается настройке.

Oracle предлагает сценарий по имени awrpt.sql (расположенный в каталоге \$ORACLE_HOME/rdbms/admin) для генерации итоговых отчетов о статистике, собранной посредством AWR.

К примеру, в отчете содержатся такие сведения, как:

- профиль загрузки;
- пять событий, занявших максимальное время;
- события ожидания и активность защелок;
- статистика временной модели;
- статистика операционной системы;
- операторы SQL, упорядоченные по времени;
- статистика табличных пространств и ввода-вывода;
- статистика PGA и советников.

Также полезным для анализа сервисом является Oracle Enterprise Manager Cloud Control.

Основными метриками СУБД, подлежащими анализу в данном случае, являются:

• DB Time - описывает общее процессорное время, затраченное Oracle для обслуживания всех пользовательских операций. Эту метрику можно использовать для мониторинга общей загрузки БД.

- Количество одновременных сессий;
- DB CPU – процент полезной нагрузки базы данных, по отношению ко времени работы базы данных;
- Buffer Hit % – процент успешных использований буферного кэша базы данных;
- Величины системных ожиданий.

На рис. 3 отображена история значений метрики, отображающей количество одновременно подключенных к базе данных сессий. Как видно из графика, своими очертаниями он повторяет график Load Average. Из этого можно сделать вывод, что большая часть нагрузки на СУБД является транзакционной, привносимой соединяющимися с базой данных сессиями.

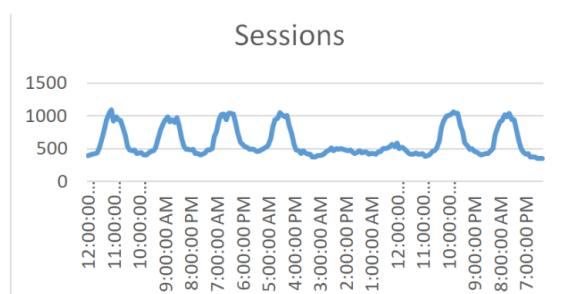


Рис. 3. История значений метрики Sessions

Рис. 4 показывает значения наиболее значительных системных ожиданий базы данных. Он показывает процент времени, затраченного БД на каждое из 10 наиболее распространенных в данной системе событий ожидания в интервале продолжительностью в одну неделю.

В соответствии с графиком, большую часть времени экземпляр занят обработкой запросов чтения ввода / вывода (тип ожидания «db file sequential read»).

Двумя другими значимыми событиями являются ожидание процессора и событие блокировки строки.

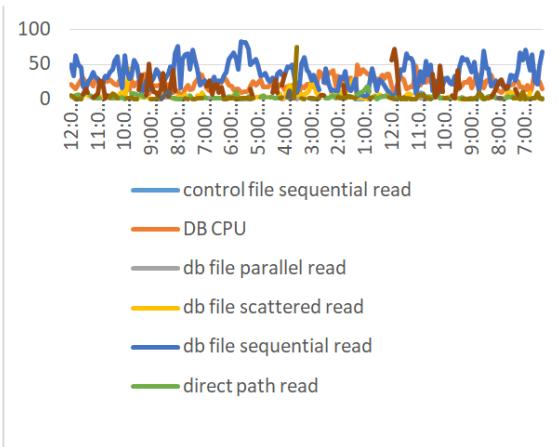


Рис. 4. История величин ожиданий системы

VII. АНАЛИЗ МАСШТАБИРУЕМОСТИ

Состояние предметной информационной системы напрямую зависит от ее архитектуры. Рассмотрим характеристики как в плане горизонтальной, так и вертикальной масштабируемости:

1) Вертикальная масштабируемость системы.

Исходя из результатов исследования оборудования, а также анализа производительности операционной системы и СУБД, можно сделать следующие выводы:

- В существующей конфигурации физическое увеличение количества ресурсов существующих серверов не представляется возможным.
- Масштабирование ресурсов системы путем покупки нового оборудования с последующей миграцией, в свою очередь, является комплексной задачей, и требует масштабных затрат.

Из вышеперечисленного следует, что предметная информационная система имеет крайне ограниченные возможности в плане вертикальной масштабируемости.

2) Горизонтальная масштабируемость системы.

Во время исследования архитектуры системы было выявлено, что ранее уже был внедрен подход по распределению нагрузки (отдельное окружение, выделенное для подключений, производящих исключительно чтение).

Существующая архитектура не является кластерной конфигурацией, а потому дальнейшее распределений нагрузки не является тривиальной задачей.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предметная система не способна масштабироваться горизонтально.

VIII. Анализ отказоустойчивого решения

На рис. 5 представлено решение отказоустойчивости исследуемой системы.

Как видно из рисунка, существующая подсистема отказоустойчивости состоит из:

- Сервисов мониторинга и оповещения на базе Nagios - обеспечивающей мониторинг всех критически важных компонентов инфраструктуры, включая приложения, сервисы, операционные системы, сетевые протоколы, системные метрики и сеть инфраструктуру;
- Процессов резервного копирования на базе Oracle Recovery Manager;
- Систем хранения данных, сформированной в дисковый массив RAID 5, который повышает надежность хранения данных, вычисляя функцию четности и увеличивая скорость, чередуя данные на трех и более дисках.
- Выделенного хранилища резервных копий на базе дисковых массивов.

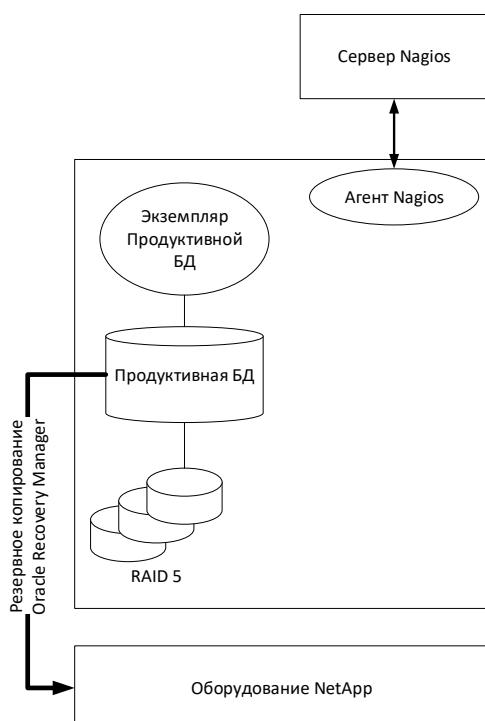


Рис. 5. Решение отказоустойчивости исследуемой системы

Согласно принятым в индустрии практикам, ключевыми показателями эффективности для подсистемы отказоустойчивости информационной системы данного класса являются:

- RPO (Recovery Point Objective) – показатель, определяющий количество данных, которое допустимо потерять, не причиняя значительного вреда предприятию. Это значение также известно, как «терпимость к потерям».

- RTO (Recovery Time Objective) – показатель, представляющий собой количество времени, в течение которого система может быть недоступна, не приводя к значительному ущербу.

Распространенной практикой является построение матрицы, производящей детализацию значений RPO и RTO по отношению к различным вариантам потенциальных ситуаций, влекущих за собой недоступность системы.

IX. Анализ и планирование ресурсов процессора

Из исследования предметной области становится понятным, что метрика Load Average не является функцией исключительно времени. Ее значение действительно изменяется с течением времени, однако данные изменения имеют циклический характер и не позволяют четко выделить и измерить тенденцию к увеличению.

По этой причине основной метрикой в данном случае выберем «Утилизацию ядер процессора», определяемую как максимальное за месяц значение Load Average.

В процессе интервьюирования заказчика было выявлено, что за время, отраженное в данных производительности, сеть магазинов заказчика существенно выросла. Из этого может следовать то, что значение утилизации ядер процессора является функцией количества площадок продаж в компании заказчика.

На рис. 6 представлен график утилизации ядер процессора по отношению к количеству площадок продаж.

Согласно данным, собранным в процессе исследования, предметная информационная система имеет устойчивую тенденцию к увеличению используемых ресурсов.



Рис. 6. Прогноз утилизации ядер процессора

На рис. 6 разрывом графика показано разделение между реальными данными и прогнозом. Кроме того, для наглядности представления информации выбрана нелинейная шкала.

X. Планирование объема базы данных

Объем системы хранения данных (СХД), используемый базой данных, также является важным фактором потребления ресурсов системой.

Дисковое пространство, занимаемое базой данных Oracle, зависит не только от объема хранимых данных. Приведем список элементов, включаемых в эту метрику, в порядке уменьшения занимаемого пространства:

- Размер файлов данных;
- Размер архивированных журналов повторного выполнения;
- Средний размер, занимаемый файлами журнализации и трассировки;
- Размер онлайновых журналов повторного выполнения;
- Размер контрольных файлов базы данных.

Кроме того, отдельного внимания требует подсистема, отвечающая за резервирование БД.

Необходимо учитывать, что объем полезного пространства, выделенного под нужды СУБД, не всегда соответствует физическому объему используемого дискового пространства. Так, при использовании технологий избыточных дисковых массивов (RAID), требования к данному ресурсу могут вырасти в 2-3 раза.

Поскольку СУБД Oracle не предусмотрен инструмент сохранения исторических данных о значениях данной метрики, для этих целей повсеместно применяются разнообразные системы мониторинга (Zabbix, HP SiteScope, Prometheus).

В нашем случае данные представляется возможным извлечь из корпоративной системы мониторинга на базе Oracle Enterprise Manager Cloud Control.

Исходя из данных, собранных в процессе исследования системы, показанных на рисунке, база данных показывает четкую тенденцию к росту. Согласно прогнозам, можно ожидать удвоения размера БД за следующие три года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костюк А.И. Структуры данных системы цифрового описания данных средств охраны и мониторинга объектов // Современные научноемкие технологии. – 2017. – № 12. – С. 43-48.
2. Костюк А.И., Шаповал Н.Е. Концептуальная модель базы геоданных объектов // Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов «Информационные системы и технологии: фундаментальные и прикладные исследования». – Таганрог, 2017. – С. 448-450.
3. Костюк А.И. Изоморфно-статистическая идентификация изображений // Современные научноемкие технологии. – 2017. – № 6. – С. 58-61. ISSN 1812-7320.
4. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.M., Kostyuk A.I. Integration of Models of Adaptive Behavior of Ant and Bee Colony. In: Silhavy R. (eds) Artificial Intelligence and Algorithms in Intelligent Systems. CSOC2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 764. Springer, Cham, 2019. SCOPUS.Online ISBN 978-3-319-91189-2.
5. Костюк А.И., Мунтян Е.Р., Поленов М.Ю. О подходе к модернизации программной системы поддержки управленческих решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 46-54. – ISSN 1999-9429 (Print).
6. Костюк А.И., Поленов М.Ю., Мунтян Е.Р., Лукьянов В.А., Николаев А.Ю. Исследование возможности внедрения виртуализации в системах управления Smart House. Информатизация и связь. – 2015. – № 3. – С. 72-77. – ISSN: 2078-8320.
7. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.O., Kostyuk A.I. VLSI Planning Based on the Ant Colony Method. In: Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Vasileva M., Sukhanov A. (eds) // Proceedings of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'17). IITI 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 679. – P. 388-398. – Springer, Cham.
8. Поленов М.Ю., Костюк А.И., Лукьянов В.А. Анализ существующих угроз для безопасности виртуальной среды. Информационные технологии, системный анализ и управление // Сборник трудов XII Всероссийской научной конференции. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 1. – С. 76-78.
9. Мунтян Е.Р., Костюк А.И., Лиотвейзен В.В. Особенности виртуальной карты для расчета маршрута соединений. Инновационное развитие современной науки: сборник статей Международной научно-практической конференции (14 марта 2015 г., г. Уфа). в 2 ч. Ч. 1. – Уфа: Аэтерна, 2015. – С. 49-52..
10. Костюк А.И., Беспалов Д.А., Волошин А.В. Принципы создания архитектуры распределенной базы данных для задачи охраны периметра // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Естественно-математические и технические науки». – Майкоп: Изд-во АГУ, 2020. – Вып. 3 (266). – С. 80-86.

An overview of existing approaches to representing a dynamic intellectual environment in the form of a methodological context

Nemury Silega Martínez

Facultad 3

University of Information Sciences

Havana, Cuba

nsilega@gmail.com

Annotation. Designing and implementing a dynamic intelligent systems design environment is a non-trivial research challenge. Existing approaches based on the well-established object paradigm lead to many contradictions in the construction of intelligent systems. One of the main contradictions is the fact that in the existing paradigm, intelligent systems are built on the basis of historical data, intended at the same time to generate new, previously unseen entities. The new paradigm of building intelligent systems and design environments should focus only on formalizing the judgments and reasoning of the subject, whose functions are intended to replace the system / environment. These judgments and reasoning are determined by the methodological context - the space or coordinate system in which the subject's thinking is carried out. In this regard, for the development and implementation of a dynamic intelligent systems design environment, it is necessary first of all to formalize the context. This article presents the results of the analysis of research works devoted to the problems of the context and related concepts.

Keywords: context, methodology, formalization, intelligent system.

I. INTRODUCTION

A **paradigm** is a philosophical or theoretical framework within which **theories**, **laws**, **generalizations**, and the research performed in support of them are formulated. Other terms are sometimes used for paradigm. Creswell, in a textbook on research design, uses the term **-worldview**. Crotty uses the term **-epistemology**. For purposes of this discussion, the word paradigm will be used. A **paradigm** influences the way research is conducted and the way knowledge is studied and interpreted. It establishes the aim, motivation, and expectations for the research. In conducting research, choices of methodologies, methods, and design should follow only after a paradigm has been established. In fact, without establishing a paradigm as the first step, there is little basis for subsequent choices regarding methodology and methods. A standardized taxonomy of research paradigms in the social sciences does not exist. Like the word paradigm itself, different terms have been used to describe similar paradigms, some of which overlap and can be the source of confusion. Among the most popular paradigms in social science research are positivism, postpositivism, constructivism, interpretivism, transformation, emancipation, advocacy, critical research, pragmatism, and deconstructivism. In the following sections, several popular paradigms will be briefly examined.

Methodologies are strategies that provide direction and a plan for researchers as they prepare and conduct their inquiries. These **methodologies** can essentially be characterized as *quantitative*, *qualitative*, or *mixed*. The debates among the proponents of these methodologies, especially the first two, have been long and at times rancorous. Pring proposes that the debate between *quantitative* and *qualitative methodologies* is the age-old debate between mind and body. The *quantitative* represents the objective, real-world, body traditions, while the *qualitative* represents the socially constructed mental or mind traditions. However, the real world, or the world of common sense, cannot be captured by one or the other, and indeed there must be an overlapping of the two. Hence the call for, or at least a consideration of, mixed methods where appropriate. Pring argues that a qualitative investigation can clear the ground for the quantitative—and the quantitative can be suggestive of differences to be explored in a more interpretive (*qualitative*) mode. *Qualitative* research relies on meanings, concepts, **contexts**, descriptions, and settings, while quantitative research relies on measurements and counts. *Qualitative* research requires seeing, hearing, and perhaps touching and experiencing activities in natural environments. *Quantitative* research requires a distancing from the object of study, while the sorting, counting, and analysis of numerical data are done away from their sources.

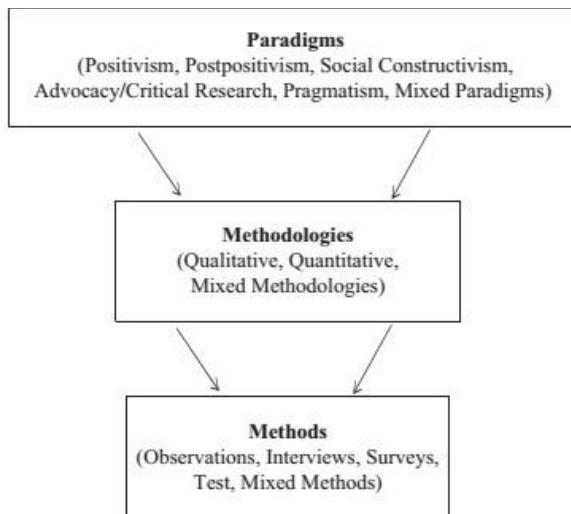


Fig. 1. Three-Tier Conceptual Framework for Conducting Research

Methodology as a term is highly contested, much abused, and frequently ignored. It is referred to either as **method**, or as **metatheoretical** critique of the constructing of **theory**. It is, thus, either collapsed into **method** or collapsed into **metatheory** and in either locale it disappears. Rarely, however, is methodology attended to as that branch of metatheory which involves the reflexive analysis and development of methods -- with methods defined broadly as methods of theorizing, observing, data collecting, analyzing, and interpreting. The result is that we lack a vocabulary for talking about methodology, a vocabulary which attends to the philosophic mandate in the term, the way in which it might build a bridge between **metatheory** and **method**, and, thus, make more obvious the impacts of these on research and its **theory**-constructings [1].

As noted by Dervin [1], the notion of **methodology** is often reduced to **method**, although it refers rather to the theoretical analysis of **methods**. Likewise, Hjørland [2] argues for a clear-cut distinction of **methods** that refers exclusively to **techniques** versus **methodologies** that are concerned with problems of epistemology or the philosophy of science. Furthermore, Cibangu emphasizes that both **methods** as specific research strategies including procedures like data collection and data analysis as well as **methodologies** as sets of such methods are grounded in foundational paradigms [3].

Methodology as differentiated from methods, is concerned with problems of the philosophy of the (social) sciences and of epistemology. **Method**, however, refers to techniques only. Therefore the distinction between 'methodology' and 'method' is clear cut" [3].

Different theoretical approaches to an investigation implies the relevance of different research **methods** (both the choice of **theoretical framework** and of **methods** are often quite unconscious). Some important **methodological** distinctions (generally in the social sciences) are:

- Methodological individualism.
- Methodological collectivism.
- Quantitative methodologies.
- Qualitative methodologies.

Theory as a term is used loosely in scholarship sometimes referring to that which results from and is tested by our work (substantive or unit theorizing); sometimes to that which guides our work (metatheorizing) [1].

II. INTERDISCIPLINARY ENGAGEMENTS

Area studies and quantitative research methodology can be seen as opposite ends of a continuum. They represent **humanistic** and **scientific** approaches to social science, and for better or worse these are often opposed to each other. But by looking at the interdisciplinary character of each we can get a better sense of the issues than simply by applying those nineteenth-century labels [4].

A. Area studies

Area studies mobilize different disciplinary perspectives in order to achieve an inclusive, integrated view of societies or cultures in different settings. It is in a sense holistic, trying to bring all different aspects of knowledge about its particu-

lar focus together. Work done in area studies fields may in turn inform and improve disciplinary inquiries, but this is usually not its *raison d'être*.

B. Quantitative research methodology

Quantitative research methodology—the actual study of methods, not just the use of them—does not pose any particular topic or focus for investigation. It improves tools. But with the tools comes an orientation to abstracting particular aspects of social life from their contexts—whether variables, or mechanisms, or dimensions of structure. The methods have affinities to certain ways of thinking about social reality

One may of course use quantitative methods in area studies. The point is not radical mutual exclusion. It is the contrast between seeking context-specific knowledge and seeking the capacity to disembed findings from specific contexts. But the disciplines—especially the so-called core social science disciplines of economics, political science, and sociology—are set up in terms of the disembedding project, for each claims a domain of life distinct from the others and from any one context in which examples of that aspect of life appear.

Accordingly, it is much easier for the disciplines to appropriate the results of quantitative research **methodology** as new tools, while the area studies fields look like competitors.

The image of a continuum is informative, then, but also problematic. As we have noted, for example, both area studies and quantitative research agendas were informed by the desire to address public problems. They each had a **'pure science'** or **'purely scholarly'** dimension and ambition, but they also engaged researchers and perhaps especially attracted funders because of the belief that they could help the country and the world address social issues. Many other interdisciplinary projects, arguably falling between the poles of the continuum, reflect this orientation to public problems and practical action more directly.

III. CONTEXT

Computer scientists' definitions of context can be loosely placed into three distinct types: those that describe the primary focus of context from the perspective of (a) the application, (b) the user, and (c) any entity of interest [5].

Computer scientists' definitions of context can be loosely placed into three distinct types: those that describe the primary focus of context from the perspective of (a) the application, (b) the user, and (c) any entity of interest.

Davies and Thomson remarked that the main reason for context assuming a central role in various research areas is "the acknowledgement, explicit or implicit, that organisms, objects and events are integral parts of the environment and cannot be understood in isolation of that environment" [5].

Computer scientists' definitions of context can be loosely placed into three distinct types: those that describe the primary focus of context from the perspective of (a) the application, (b) the user, and (c) any entity of interest.

Primary Focus as the Application. Moran and Dourish defined context as the *"physical and social situation in which computational devices are embedded"* (p. 3). Ward, Jones, and Hopper view context as *the state of the application's surroundings*. Similarly, Brown defined context as *the elements of the user's environment that the user's computer*

knows about. Chen and Kotz defined context as the –*set of environmental states and settings that either determines an application's behaviour or in which an application event occurs and is interesting to the user*” [6].

Primary Focus as the User. Dey, Abowd, and Wood defined context as *the user's physical, social, emotional, or informational state*, whereas Zetie described context in software applications as –*the knowledge about the goals, tasks, intentions, history and preferences of the user that a software application applies to optimizing the effectiveness of the application*”. Zetie also identified the key dimensions of context by asking questions about the user: *who the user is* (e.g., *personal characteristics*), *what the user is doing* (i.e., *activity/task*), *where the user is*, and *how to contact the user* (*based on his or her location, time of day, preferences, priority of interaction, etc.*). Similarly, Schilit, Adams, and Want treated the user as the primary entity to ask questions such as where you are, who you are with, and what resources are nearby.

Primary Focus as Any Entity of Interest. Schmidt views context as *facts that matter for an application/user/device, which are inherently connected to time and location*. In more general definitions, Funk and Miller described context as –*everything surrounding an item of interest, including the 'mindset' of any humans involved in the context*”. Similarly, Dey and Abowd defined context as –*any information that can be used to characterize the situation of an entity. An entity is a person, place, or object that is considered relevant to the interaction between the user and an application, including the user and application themselves*” [5].

Context - the set of symbolic expressions or representations that surround a Target Entity (TE) and help one to express, make sense of, translate or otherwise act upon or within it (e.g. the discourse within which a statement is embedded; other documents filed in the same category; formal theory within which a concept or statement is to be understood) [6].

Context2 – objective or socially constructed characteristics and conditions of the situation in which a TE is, appears or occurs (e.g. location; temperature; being under water; occurring as part of a traditional ritual2; position within the reporting structure of an organizational hierarchy; relative arrangement and orientation of objects; existence and accessibility of other surrounding objects3) [6].

Context3 – aspects of the mental or physical state, disposition, intentions, identity or recent experiences of an actor that bear upon how she interprets, understands, acts within, or what she notices of, the situation at hand [6].

Context: some kind of a background for something the researcher wishes to understand and explain. In practice, context in INS [information needs and seeking] studies usually refers to any factors or variables that are seen to affect individuals' information-seeking behavior: socio-economic conditions, work roles, tasks, problem situations, communities and organizations with their structures and cultures, etc [7].

IV. CONTEXT AS A METHODOLOGICAL TOOL

There are several approaches in different domains that analyze the effect of the context:

- Approaches to the temporal context of information seeking [8]:
 - First, time may be conceptualized as a fundamental attribute of situation or context of information seeking.
 - Temporal factors can also be defined as qualifiers of access to information.
 - Temporal factors specify the information seeking as a process.
- Many researchers in computer science have illustrated the benefits of understanding context. Dey remarked that it could lead to improved usability of context-aware applications. Dey and Abowd stated that –by improving the computer's access to context, we increase the richness of communication in Human–Computer Interaction (HCI), making it possible to produce more useful computational services” (p. 1). An understanding of context will also enable application designers to choose what context to use in their applications, therefore helping them to determine what context-aware behaviors to support. Brezillon and Abu-Hakima remarked that context plays an important role in person–machine and machine–machine interactions and in the representation of knowledge-based systems.
- Context is also analyzed and discussed considerably within industry and is regarded as the key to unlocking the true value of business applications on handheld devices. For example, Sun Microsystems, Giga Information Group, and US Bancorp Piper Jaffray have recently identified context as a key enabling technology missing from today's mobile platform applications. It is therefore not surprising that next-generation applications and Web services are increasingly taking into account the user's context to use contextual information to modify the application's business logic, presentation, and navigation [5].
- The notion of context has also been investigated within many other areas of research, including **artificial intelligence (AI)**, neuroscience, pragmatics, and philosophy. Researchers in AI, for instance, have recently attempted to formalize context in order to model it in computer simulations. They are predominantly interested in how context is connected to reasoning, for instance, how people change their perspective, their line of reasoning, how they think of and compare states of the world in different situations or moments of time. See Theodorakis and Spyros for a detailed discussion of issues of context in AI. **Neuroscientists**, however, have explored the differences between implicit and explicit memory and learning, shedding light on the mechanisms that process information

in the human brain. A number of differences have been discovered, as described by Tijus (2001), between explicitly and implicitly represented information and its processing and storage [5].

A comparative analysis indicated that some authors has changed his vision of pedagogical issues influenced by the change of the state ideology. For example, Pedagogical position of P.P. Blonsky is reflected in 1916 publication and contains a positive attitude toward religious dimension of human life. The teacher turns to this question several times in different contexts, first assessing Christianity as a doctrine of morality then considering its impact on the formation of the child in the process of school and family education and upbringing and eventually when discussing the inclusion of the foundations of the Christian faith into the school curriculum. Hence, they define the context as a particular determinant allowing to achieve efficient characteristics of the comparison. In comparative pedagogical research the focus of researcher's theoretical understanding is formed not only by the texts with easily comparable contents using a certain criteria and with a predetermined objective. For the researcher it is important to understand the **micro** and **macro contexts** of origination and functioning of the processes and phenomena. The circumstances of the author's life and the specificity of the historical environment in which the text(s) was (were) created are particularly important. Thus comparative approach focusing at the study of historical and subjectively meaningful author's context s will expand its boundaries and result in not much systematized descriptions of the foreign education al issues made in the analytic and synthetic key [9].

V. TRAN-SUBJECTS STUDIES

Context: a process whereby a person consciously or unconsciously compares an external context with acquired personal experiences/knowledge (both of which may contain task, physical, social, and temporal dimensions) to form goals for undertaking concise actions, possibly with other people and/or objects.

Chen and Kotz illustrated the discrepancies in the use of the word *context* within different areas of computer science (e.g., context-sensitive help, contextual search, multitasking context switch, etc.). The advent of mobile context-aware computing, for instance, has stimulated broad and contrasting interpretations, due to the shift from traditional static desktop computing to heterogeneous mobile environments. This transition poses many challenging, complex, and largely unanswered research issues relating to contextual interactions and usability. For context-aware systems to seamlessly support and enrich a user's mobile activities, there is a need to understand context from a multidisciplinary viewpoint. Current design frameworks, however, are predominantly software oriented, making it difficult to capture and effectively manage human variability.

Bellotti and Edwards stated that –it is the human and social aspects of context which are crucial in making a context-aware system a benefit rather than a hindrance—or even worse—an annoyance". Selker and Burleson stipulated how context-aware design needs to explicitly draw on cognitive science, user experience, and situation in the design process [5].

VI. CATEGORIZATION OF CONTEXT

Categorizations of contextual information used within a communication act have been proposed. Bunt believes that the relevant factors of conversational context can be grouped into five categories:

- 1 *Linguistic*: Properties of the surrounding linguistic material (textual or spoken).
- 2 *Semantic*: Constructed by the underlying task and the task domain (the objects, properties, and relations relevant to the task).
- 3 *Physical*: The physical circumstances/environment in which the interaction occurs.
- 4 *Social*: The type of interactive situation, combined with the participant's roles in that situation, as depicted in terms of their communicative rights and obligations.
- 5 *Cognitive*: The participants' beliefs, intentions, plans and other attitudes; their states of processing relating to perception, production, interpretation, evaluation, execution; and their attentional states.

Connolly separated between the *linguistic* context and *nonlinguistic* (or *situational*) context. *Linguistic context* refers to the units that give meaning to words, phrases, or sentences. Connolly identified two types:

- 1 *Cotext*: The text that surrounds a unit of language (words, phrases, etc.) that gives its linguistic context. This is similar to the concept of *anaphora*, whereby the coreference of one expression is made with its antecedent. The antecedent provides the information necessary for the expression's interpretation—for example, when the name *Davidis* replaced with *his* in for succeeding text.
- 2 *Intertext (or intertextuality)*: The notion that, to comprehend/interpret part of one text, information from some other text may be required. *Situational context* refers to the pertinent aspects of the environment that are nontextual in nature (but where the text exists), for example, an author's cognitive decisions and ideas regarding the compilation of the text.

Several authors provide taxonomies of context [6], which get at this dynamic interchange between artifacts, symbols and a surrounding set of conditions or activities. For example, Léger, Tijus & Baccino distinguish task, visual and semantic context; Ingwersen & Järvelin identify intra-object, inter-object, social, organizational, cultural and systemic context. Agre distinguishes between architectural and institutional aspects of context, and he discusses challenges that emerge when the two are not clearly aligned. The InterPARES project identifies juridical, administrative, provenancial, procedural, documentary, and technological context. Formal information systems (e.g. theories,⁶ databases, library catalogs) also act at the intersection of several context types. Many of the conventions for activities that build and maintain our "epistemic infrastructure" - e.g. scholarly research, developing inventories of collections - are attempts to surround expressions about aspects of the world (context2) with sufficient and appropriate supporting information (context1) so that they will be interpreted by future readers or listeners in (at least relatively) predictable ways [6].

VII. REPRESENTATION OF CONTEXT

The model [5] represents how, prior to an utterance, a person, represented by either Cognitive Context 1 or 2, first processes (i.e., rejects or accepts contextual information) and selects a noncommunicative goal, which is then used to select a communicative goal. The communicative goal of verbalizing the associated noncommunicative goal then shapes/constructs the social and task context, the intertext, and the context. Whether it is an utterance or discourse, both the cognitive contexts will expand with more contextual information, which is used to process and select future goals. After the utterance has occurred, this becomes the context to the next utterance. Similarly, after this discourse, the utterance will form the intertext to the next discourse. Last, all of this operates within a physical and temporal context (i.e., it has been influenced by previously occurring events).

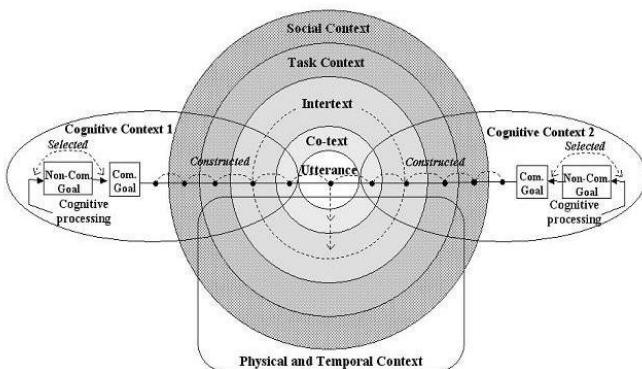


Fig. 2. Propeller model of context within the linguistics domain

Coutaz and Rey proposed a mathematical model in which the context of a situation is defined as the *—set of peripic variables and relations between them.*” The following formula represents how a series of situations (i.e., snapshots in time) are combined to give the context for a user (U), task (T), and time (t): **Context** (U, T, t) = **Cumul**[**Situation** (U, T, t_0) ... **Situation** (U, T, t_n)]. In this formula, *Cumul* is a union operation that labels peripic variables and remaps relationships between variables as necessary. Coutaz and Rey also introduce the notion of contextor, which is a reflexive and hierarchically composable context sensor with data inputs and outputs plus control inputs and outputs.

The contrasting viewpoints, definitions, and categorizations of context within the area of **computer science** have been illustrated in the model shown in Figure 3. Whether the primary focus is from the perspective of the user, the application, or from any entity of interest, Figure 3 illustrates the key components and characteristics of context that are present during user-computer interaction (i.e., use context).

As shown, surrounding people and objects may influence the user-computer interaction, making it an intrinsic factor in shaping the use context. The broken line demonstrates how, as a result of temporal changes, other objects and people may pass from being relevant or irrelevant to the interaction taking place.

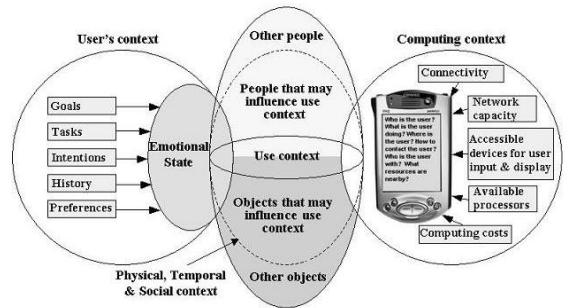


Fig. 3. Model of context in computer science

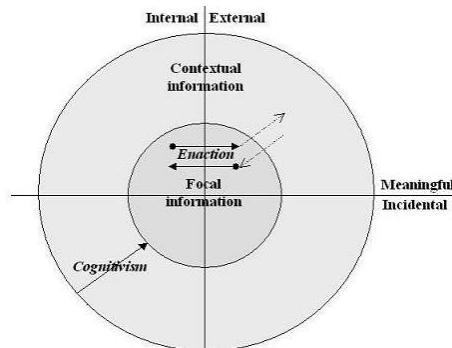


Fig. 4. Model of context in psychology

A. A multidisciplinary model of context

Two versions of a multidisciplinary model of context are presented: (a) an outline version and a detailed version [5]. The model captures the relationship between different interpretations of context by researchers within psychology, computer science, and linguistics. The key principles are described under three headings, concerning (a) the differentiation of the user and application’s world, (b) the separation of meaningful and incidental dimensions of context, and (c) the user and application’s processes.

B. Differentiation of User and Application’s World

The horizontal center line shown in the outline model in [5], separates the user’s world from the application’s world.

The oval-shaped circle in the center of model [5] represents what is focal to the:

- 1 *User* with respect to carrying out actions in an attempt to achieve goals (e.g., interact with Palmtop to find the time of a train home, interact with self-service ticket machine to acquire a train ticket). Goals and associated actions may be interrelated and form part of a higher level structure or goal (e.g., to get home). Actions can also occur independently or simultaneously.
- 2 *Application* with respect to transmitting contextual information and services to the user (e.g., alerting the user that a friend is in a nearby café).

In contrast, the circular layer that surrounds the user and application’s world represents anything in the contextual world that influences the process in which focal user actions are undertaken and focal application services are executed. The contextual world can be broken down into several dimensions, four of which are common to both the user and application and are described as follows:

- **Task context:** The functional relationship of the user with other people and objects and the benefits (e.g., resources available) or constraints (e.g., time pressure) this relationship places on the user's achievement of his or her goal.
- **Physical context:** The environmental location, including its gradient and altitude, consisting of surrounding physical objects, such as buildings, cars, trees, and so on. This also includes the orientation, position, state, and purpose of those objects and the types of information they transmit through audio and visual means, odor, texture, temperature, and movement. Contrasting weather conditions (e.g., cloudy or sunny, cold or hot, etc.) and lighting conditions (e.g., daylight or darkness) may also influence how objects are perceived.
- **Social context:** The relationship with; dialogue from; and density, flow, noise, and behavior of surrounding people (e.g., sitting on a crowded train).
- **Temporal context:** The temporal context is embedded within everything (as illustrated in Figure 9) and is what gives a current situation meaning, based on past situations/occurrences; expected future events; and the higher level temporal context relating to the time of day, week, month, or season.

Another contextual dimension affecting the user's world is the application's context, which to the user would concern transmitted information regarding focal application services and his or her perception of the application's capabilities or limitations and of how it operates. Although part of the user's world, the cognitive context also affects focal actions, as described next.

- Cognitive context: A user's cognitive processing abilities, short- and long-term memory abilities, dislikes and preferences, opinions and beliefs, cultural interpretations, perceptual sensing abilities, cognitive mapping strategies for encoding spatial information, and so on.

Within the application's world, another contextual dimension that could be sensed is the user's context. This may include information regarding (a) the user's personal diary, including planned activities, notes, and reminders, as well as user-defined application settings and preferences; (b) physiological sensing, such as heart rate, to measure levels of anxiety; and (c) monitored behavioral patterns of the user. Similarly, although part of the application's world, the application context also affects how focal services are executed, as described next.

- Application's context: The capabilities and limitations of both the application (e.g., battery usage life, processor speed, memory capacity, sensors, input and output technologies, etc.) and the sources from which data are derived (e.g., the processing speed of a Web-based server).

VIII. CONCLUSION

The results of the analysis of approaches to the formalization of the concept of context, as well as to the formulation of related concepts, presented in this paper, show the reliability of the hypothesis that the construction of intelligent systems within the framework of the existing paradigm is not possible. The main reason is that the known methods and approaches focus on the results of mental activity - objects, entities. This leads to the fact that without a subject who has formed an object or essence, it is impossible to adequately evaluate and perceive it. Further research within the framework of the project is planned to focus on the formalization of the subject's methods of presenting his judgments and reasoning, as well as the development of methods for documenting them.

REFERENCES

1. *Dervin B.* On studying information seeking methodologically: the implications of connecting metatheory to method // *Information Processing & Management*. – 1999. – 35 (6). – P. 727-750.
2. *Hjørland B.* Library and information science: practice, theory, and philosophical basis.
3. *Kleinberg M.* Integral methodological pluralism: an organizing principle for method classification. in *Knowledge Organization for a Sustainable World: Challenges and Perspectives for Cultural, Scientific, and Technological Sharing in a Connected Society* Proceedings of the Fourteenth International ISKO Conference. 2016.
4. *Information processing & management*. – 2000. – 36(3). – P. 501-531.
5. *Froedeman R., Klein J.T. and Pacheco R.C.D.S.* *The Oxford handbook of interdisciplinarity*. 2017: Oxford University Press.
6. *Bradley N.A. and Dunlop M.D.* Toward a multidisciplinary model of context to support context-aware computing // *Human-Computer Interaction*. – 2005. – 20 (4). – P. 403-446.
7. *Lee C.A.* Taking context seriously: a framework for contextual information in digital collections. UNC SILS TR-2007-04, 2007.
8. *Kari J. and Savolainen R.* Towards a contextual model of information seeking on the Web // *The New Review of Information Behaviour Research*. – 2003. – 4 (1): – P. 155-175.
9. *Savolainen, R.* Time as a context of information seeking // *Library & Information Science Research*. – 2006. – 28 (1). – P. 110-127.
10. *Fedotova O. and Chigisheva O.* Comparative analysis: Methodological optics in the ideological context, in *Comparative Sciences // Interdisciplinary Approaches*. 2015, Emerald Group Publishing Limited.

Разработка и исследование квантовых глубоких нейронных сетей для решения задач различных классов сложности

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

Коробейникова Наталья Михайловна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
nkcorobeynikova@sfedu.ru

Горбунов Александр Валерьевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
avgorbunov@sfedu.ru

Аннотация. За последние несколько десятилетий произошел значительный прорыв в области глубокого обучения и квантовых вычислений. Исследования на стыке этих двух областей вызывают растущий интерес, что в последнее время привело к развитию квантового глубокого обучения и методов глубокого обучения, основанных на квантаках. В работе описан недавний прогресс в квантовых алгоритмах глубокого обучения и их приложениях для обработки естественного языка. Реализовано построение слоев квантовой нейронной сети.

Annotation. The past few decades have seen significant breakthroughs in deep learning and quantum computing. Research at the intersection of these two areas is generating growing interest, which has recently led to the development of quantum deep learning and quantum-based deep learning methods. This paper describes recent advances in quantum deep learning algorithms and their applications for natural language processing. Implemented the construction of layers of a quantum neural network.

Квантовый алгоритм, запутанность, кубит, квантовый гейт, квантовый симулятор.

Quantum algorithm, entanglement, qubit, quantum gate, quantum simulator.

I. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к квантовому компьютерингу [1] был стимулирован открытием в середине 1990-х гг. нескольких алгоритмов, позволяющих за рациональное время решать на таком устройстве безвыходные для обычного компьютера задачи. Хотя квантовые вычисления еще не готовы к переходу от теории к практике, тем не менее, можно обоснованно догадываться, какую форму, возможно, квантовый компьютер примет или, что более важно для дизайна языка программирования, по какому интерфейсу можно будет взаимодействовать с таким квантовым компьютером.

Лет 20 назад ученым удалось создать искусственные ловушки для одиночного иона (или атома), а в последние годы появились ловушки, в которых можно удерживать много атомов или ионов. В ловушках легко исследовать физические свойства изолированных атомов, управлять их излучением, воздействуя на атом извне световыми импульсами, электрическими и магнитными полями, меняя температуру. В случае большого количества атомов – исследовать их коллективные свойства (в частности, сверххолодную жидкость – бозе – конденсат). Квантовые компьютеры используют принципы квантовой механики [2] для вычислений, которые более мощные, чем классические компьютеры во многих вычислительных задачах. Были разработаны многие алгоритмы квантового машинного обучения, такие как квантовая машина опорных векторов, квантовый анализ главных компонентов и квантовая машина Больцмана, и эти алгоритмы оказались более эффективными, чем их классические версии.

В последние годы глубокие нейронные сети (ГНС) стали наиболее важным и мощным методом машинного обучения, которые широко применялись в компьютерном зрении, обработке естественного языка и многих других областях. Основной единицей ГНС является перцептрон [3] (рис. 1), который представляет собой аффинное преобразование вместе с функцией активации. Нелинейность функции активации и глубина придают ГНС большую презентативность. Были предложены подходы к построению классических ГНС на квантовых компьютерах. Но структура классических ГНС все еще используется, и только некоторые локальные операции ускоряются квантовыми алгоритмами. Известно, что с зашумленные кванты промежуточного масштаба (ЗКПМ) будут единственными квантовыми устройствами, которые можно будет использовать в ближайшем будущем, где можно будет использовать только ограниченное количество кубитов без исправления ошибок. В последнее время широкое распространение получили параметризованные квантовые схемы

(ПКС), поскольку ПКС могут быть эффективно реализованы на устройствах с зашумленными квантами промежуточного масштаба (ЗКПМ).

Было предложено несколько моделей квантового машинного обучения ЗКПМ, основанных на ПКС, таких как квантовые генерирующие состязательные сети, машина Борна с квантовыми схемами и методы квантового ядра. ПКС также называют квантовыми нейронными сетями (КНС) из-за их послойной структуры схем, а КНС используются для задач машинного обучения. В этой статье представим квантовую глубокую нейронную сеть (КГНС), которая представляет собой композицию из нескольких уровней квантовой нейронной сети (УКНС). Докажем, что КГНС может равномерно аппроксимировать любую непрерывную функцию и обладает большей представительской способностью, чем классическая ГНС.

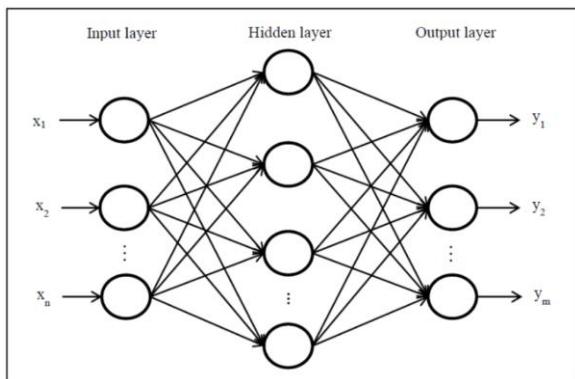


Рис. 1. Классическая нейронная сеть

В отличие от других подходов квантовых аналогов ГНС, наша КГНС (рис. 2) по-прежнему сохраняет преимущества классической ГНС, такие как нелинейная активация, многослойная структура и эффективный алгоритм обучения обратного распространения. Входы и выходы КГНС являются классическими, что делает КГНС более практическим. Поскольку УКНС основаны на ПКС, КГНС может использоваться в процессорах ЗКПМ.

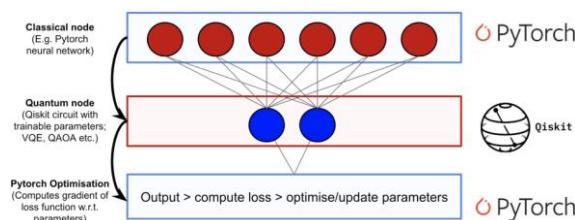


Рис. 2. Квантово-классическая нейронная сеть

Как показали эксперименты, при классификации изображений можно использовать КГНС с небольшим количеством (восемь) кубитов. Таким образом, КГНС предоставляет новый класс нейронных сетей, которые могут использоваться в квантовых компьютерах краткосрочно-го использования, и они более мощные, чем классические ГНС. Структура УКНС аналогична структуре КНС. Обычно в модели КНС существует только один гамильтониан [4], тогда как в УКНС существует несколько гамильтонианов, и на выходе будет добавлено смещение. Многоразмерный вывод УКНС позволяет строить многоуровневую структуру в КГНС. Мы используем УКНС

в качестве строительных блоков КГНС и используем несколько ПКС, которые будут обучаться одновременно. Свойство универсальной аппроксимации КГНС проистекает из его многослойной структуры. КНС может рассматриваться как специальная однослойная КГНС и не имеет свойства универсальной аппроксимации.

II. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ КВАНТОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Квантовый компьютер – это вычислительный прибор, который основан на использовании для вычислений таких квантово-механических явлений, как суперпозиция и запутывание [5] (перепутывание) для преобразования входных данных в выходные. В классическом компьютере количество данных измеряется битами, а в квантовом компьютере – кубитами. Основополагающий принцип квантовых вычислений состоит в использовании квантово-механических объектов для представления данных и их обработки. Квантовый компьютер (в отличие от обычного) оперирует не битами (способными принимать значение либо 0, либо 1), а кубитами, имеющими значения одновременно и 0, и 1. В результате можно обрабатывать все возможные состояния одновременно, достигая гигантского превосходства над обычными компьютерами в ряде алгоритмов.

Полноценный универсальный квантовый компьютер является пока гипотетическим устройством, сама возможность построения которого связана с серьёзным развитием квантовой теории в области многих частиц и сложных экспериментов; разработки в данной области связаны с новейшими открытиями и достижениями современной физики. На середину 2010-х были практически реализованы лишь единичные экспериментальные системы, исполняющие фиксированный алгоритм небольшой сложности.

Один классический бит может находиться в одном и только в одном из состояний $|0\rangle$ или $|1\rangle$. Квантовый бит, называемый кубитом [6], находится в состоянии $|\Psi\rangle=a|0\rangle+b|1\rangle$, так что $|a|^2$ и $|b|^2$ – вероятности получить 0 или 1 соответственно при измерении этого состояния; $|a|^2+|b|^2=1$. Сразу после измерения кубит переходит в базовое квантовое состояние, соответствующее классическому результату.

Квантовые вычисления – это альтернатива классическим алгоритмам, основанная на процессах квантовой физики [7]. Она гласит, что без взаимодействия с другими частицами (то есть до момента измерения), электрон не имеет однозначных координат на орбите атома, а одновременно находится во всех точках орбиты. Область, в которой находится электрон, называется электронным облаком. В ходе известного эксперимента с двумя щелями один электрон проходит одновременно через обе щели, интерферируя при этом с самим собой. Только при измерении эта неопределенность склоняется и координаты электрона [8] становятся однозначными.

Вероятностный характер измерений, присущий квантовым вычислениям, лежит в основе многих алгоритмов – например, поиск в неструктурированной БД. Алгоритмы данного типа пошагово увеличивают амплитуду правильного результата, позволяя получить его на выходе с максимальной вероятностью.

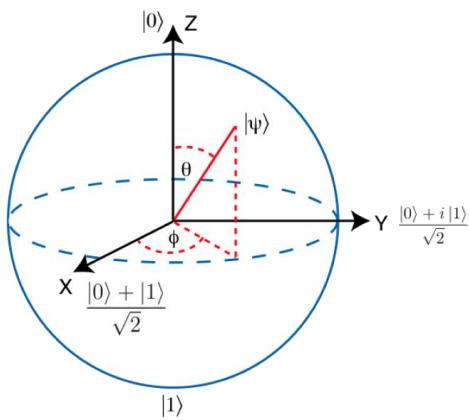


Рис. 3. Сфера Блоха

В квантовых вычислениях физические свойства квантовых объектов реализованы в так называемых кубитах. Классический бит может находиться только в одном состоянии – 0 или 1. Кубит до измерения может находиться одновременно в обоих состояниях, поэтому его принято обозначать выражением $a|0\rangle + b|1\rangle$, где A и B – комплексные числа, удовлетворяющие условию $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Измерение кубита мгновенно «схлопывает» его состояние в одно из базисных – 0 или 1. При этом «облако» коллапсирует в точку, первоначальное состояние разрушается, и вся информация о нем безвозвратно теряется.

III. КВАНТОВЫЕ ГЛУБОКИЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

ГНС состоит из большого количества слоев нейронной сети, и каждый уровень нейронной сети является нелинейной функцией

$$f_{W^\rightarrow, b^\rightarrow}(x^\rightarrow) : R^n \rightarrow R^m \quad (1)$$

с параметрами $W^\rightarrow, b^\rightarrow$. В классической DNN $f_{W^\rightarrow, b^\rightarrow}$ принимает вид $\sigma \circ L_{W^\rightarrow, b^\rightarrow}$, где $L_{W^\rightarrow, b^\rightarrow}$ – аффинное преобразование, а σ – нелинейная функция активации. Сила ГНС заключается в нелинейности функции активации. Без функций активации ГНС будут не чем иным, как аффинными преобразованиями. Однако все квантовые вентиля являются унитарными матрицами и, следовательно, линейными. Таким образом, ключевым моментом разработки УКНС является введение нелинейности.

A. Слои квантовой нейронной сети

Построим УКНС, используя схему (рис. 4) гибридного квантово-классического алгоритма, которая широко используется во многих квантовых алгоритмах NISQ. Как показано на рис. 1, схема гибридного квантово-классического алгоритма состоит из квантовой части и классической части.

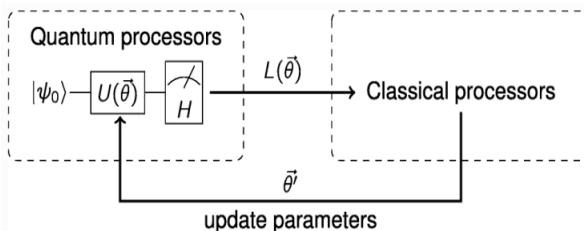


Рис. 4. Гибридная квантово-классическая схема

В квантовой части параметризованные квантовые схемы используются для подготовки квантовых состояний с помощью квантовых процессоров. В классической части параметры ПКС оптимизируются с помощью классических компьютеров. ПКС – это квантовая схема [9] с параметрическими вентилями, которая имеет вид

$$U(\theta^\rightarrow) = \prod_{j=1}^l U_j(\theta_j) \quad (2)$$

где $\theta^\rightarrow = (\theta_1, \dots, \theta_l)$ – параметры, каждый $U_j(\theta_j)$ – вентиль вращения $U_j(\theta_j) = \exp(-i\frac{\theta_j}{2}H_j)$, а H_j – вентиль из 1 или 2 кубитов, такой что $H_j^2 = I$. Например, когда H_j – одна из матриц Паули {X, Y, Z}, $U_j(\theta_j)$ – вентили вращения отдельного кубита R_X, R_Y, R_Z . Как показано на рис. 1, после закрепления схемы $U(\theta^\rightarrow)$ и гамильтониана H, можем определить функцию потерь вида

$$L = \langle 0 | U^\perp(\theta^\rightarrow) H U(\theta^\rightarrow) | 0 \rangle. \quad (3)$$

Затем можем оптимизировать L, обновив параметры θ^\rightarrow с помощью алгоритмов оптимизации. С помощью алгоритмов на основе градиента можно эффективно вычислить информацию о градиенте $\partial L / \partial \theta^\rightarrow$ что принципиально важно в нашей модели. Следовательно, сосредоточимся на алгоритмах на основе градиента. Теперь собираемся определить УКНС, который состоит из 3 частей: кодировщика, преобразования и вывода, как показано на рис. 5.

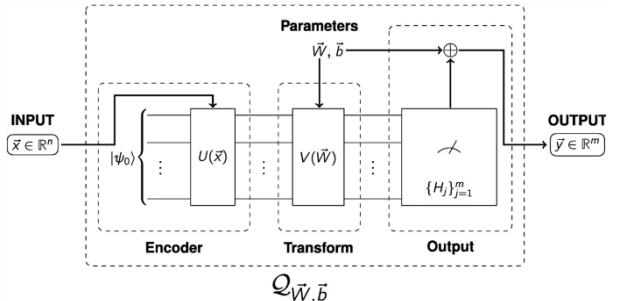


Рис. 5. Архитектура и составляющие нейронной сети

(1) Кодирование. Для классических входных данных вводим нелинейность в наши УКНС, нелинейно кодируя вход x^\rightarrow в квантовое состояние $|\psi(x^\rightarrow)\rangle$. А именно, выбираем ПКС $U(x^\rightarrow)$ с не более чем $O(n)$ кубитами и применим его к начальному состоянию $|\psi_0\rangle$, чтобы получить квантовое состояние

$$|\psi(x^\rightarrow)\rangle = U(x^\rightarrow)|\psi_0\rangle \quad (4)$$

закодировано из x^\rightarrow . ПКС по своей природе нелинейна по параметрам. Например, процесс кодирования

$$|\psi(x)\rangle = \exp(-i\frac{x}{2}X)|0\rangle \quad (5)$$

от x к $|\psi(x)\rangle$ нелинейна. Более того, можем вычислить градиент каждого компонента x^\rightarrow эффективно. Градиент ввода в каждом слое необходим при обучении КГНС. Этап кодирования аналогичен классическому этапу активации.

(2) Преобразование. После кодирования входных данных применяем линейное преобразование как аналог линейного преобразования в классических ГНС. Эта часть естественна для квантовых компьютеров, потому что все квантовые вентили линейны. Используем другой ПКС $V(W^\rightarrow)$ с параметрами W^\rightarrow для этого. Считаем, что количество параметров в $V(W^\rightarrow)$ есть $O(\text{poly}(n))$.

(3) Выход. Наконец, выходные данные QNNL будут вычисляться следующим образом. Выберем m фиксированных гамильтонианов $H_j, j = 1, \dots, m$ и вывод

$$y^\rightarrow = \begin{pmatrix} y_1 + b_1 \\ \vdots \\ y_m + b_m \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$y_j = \langle \psi(x^\rightarrow) | V'(W^\rightarrow) H_j V(W^\rightarrow) | \psi(x^\rightarrow) \rangle, \quad b_j \in R. \quad (7)$$

Математическое ожидание гамильтониана является линейной функцией матрицы плотности [10]. Здесь член смещения $b^\rightarrow = (b_1, \dots, b_m)$ является аналогом смещения в классических ГНС. Кроме того, каждый y_j представляет собой гибридную квантово-классическую схему с ПКС $U(x^\rightarrow)V(W^\rightarrow)$ и гамильтонианы H .

IV. ЗКПМ И ЕГО АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ

Поскольку вход и выход УКНС являются классическими значениями, они могут быть реализованы без использования QRAM. Более того, УКНС могут быть естественным образом встроены в классические ГНС. Нейронная сеть состоит из нескольких совместимых УКНС, а классические слои ГНС называются квантовыми ГНС:

$$QDNN = \mathfrak{I}_{L,W_i,b_i} \circ \dots \circ \mathfrak{I}_{1,W_1,b_1}, \quad (8)$$

где каждый L является классическим или квантовым слоем от $R^{n_{i-1}}$ до R^{n_i} для $i = 1, \dots, l$. Будем использовать градиентный спуск для обновления параметров. В классических ГНС градиент параметров на каждом уровне вычисляется алгоритмом обратного распространения ошибки. Предположим, что у нас есть КГНС. Рассмотрим УКНС Q с параметрами $W^\rightarrow, b^\rightarrow$, вход которых равен x^\rightarrow , а выход $-y^\rightarrow$.

Чтобы использовать алгоритм, нужно вычислить

$$\frac{\partial y^\rightarrow}{\partial W^\rightarrow},$$

$$\frac{\partial y^\rightarrow}{\partial b^\rightarrow},$$

$$\frac{\partial y^\rightarrow}{\partial z^\rightarrow}.$$

Вычисление $\frac{\partial y^\rightarrow}{\partial b^\rightarrow}$ тривиально. Поскольку U, V являются ПКС, и каждый компонент y^\rightarrow является выходом гибридной квантово-классической схемы, как $\frac{\partial y^\rightarrow}{\partial b^\rightarrow}$ и

$\frac{\partial y^\rightarrow}{\partial z^\rightarrow}$ можно оценить путем сдвига параметров.

A. Результаты экспериментов

Будем использовать КГНС для проведения численного эксперимента для задачи классификации изображений. Данные поступают из набора данных. Построим КГНС с 3 УКНС. Цель этого КГНС – распознать цифру на изображении как 0 или 1 в качестве классификатора. Данные в наборе – это $28 \times 28 = 784$ размерных изображений. Этот размер слишком велик для текущего квантового симулятора. Следовательно, сначала изменяем размер изображения до 8×8 пикселей. Используем три УКНС в нашем КГНС, которые будут называться входным, скрытым и выходным слоями соответственно. В экспериментах используем обучаемые КГНС, заимствуя локальные гамильтонианы и структуру малой глубины. Устанавливаем схему анзаца, показанную на рис. 6, которая имеет небольшую глубину. Из-за небольшой глубины анзаца и локального гамильтониана КГНС можно обучать. Также небольшая глубина позволяет запускать модель на устройствах NISQ. Гиперпараметры DT и DE выбираются в зависимости от решаемой задачи.

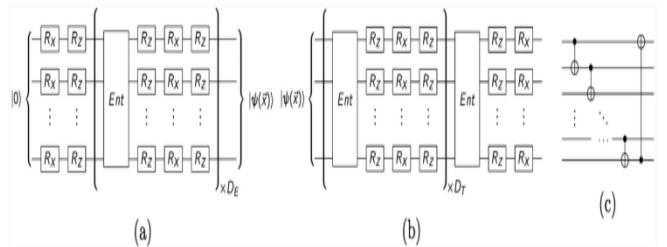


Рис. 6. Схемы анзаца в каждом УКНС. а) Схема анзаца кодировщика. б) Анзац-схема преобразования. в) Строение гейтов

B. Входной слой

Входной слой использует схему из 8 кубитов, которая принимает входной вектор $x \in R^{64}$ и выводит вектор $h^\rightarrow \in R^{24}$. Используется структура на рис. 3,а, где $DE = 2$, $DT = 5$.



Training [10%]	Loss: 2.7405
Training [20%]	Loss: 2.7030
Training [30%]	Loss: 2.6562
Training [40%]	Loss: 2.6391
Training [50%]	Loss: 2.6318
Training [60%]	Loss: 2.6275
Training [70%]	Loss: 2.6233
Training [80%]	Loss: 2.6204
Training [90%]	Loss: 2.6182
Training [100%]	Loss: 2.6168

Рис. 7. Функция потерь

C. Скрытый слой

Скрытый слой использует 6 кубитов. Принимает вектор $h_1 \in R^{24}$ и выводит вектор $h_2 \in R^{12}$. Используется структура, показанная на рис. 3b, с DE = 1, DT = 4. Поскольку в кодировщике 30 параметров, устанавливаем последний столбец вентилем R_Z равным $R_Z(0)$.

D. Выходной слой

Выходной слой использует 4 кубита. Мы используем структуру на рис. 3c с DE = 1, DT = 2. Поскольку в кодировщике 20 параметров, устанавливаем последний столбец вентилем R_Z и R_X равными $R_Z(0)$ и $R_X(0)$.

В наших экспериментах использовали разработанную ранее квантовую вычислительную систему. Все данные были собраны на настольном ПК с процессором Intel i7-4790 и 4 ГБ оперативной памяти.

Все параметры были инициализированы случайным образом. Обучаем этот КГНС для 200 итераций с размером пакета 240. Устанавливаем количество выборок при оценке математического ожидания гамильтониана каждый раз равным 100, 1000, 1000 и ∞ . Установлены гиперпараметры $\eta = 0,01$, $\beta_1 = 0,9$, $\beta_2 = 0,999$.

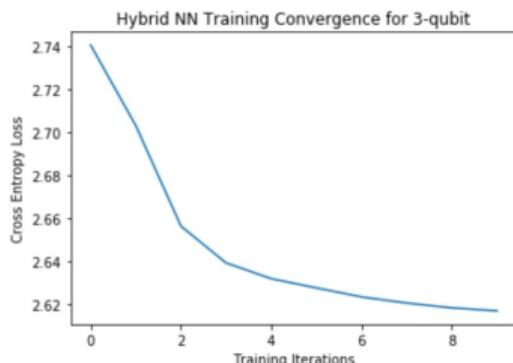


Рис. 8. График итераций обучения сети

Значения функции потерь на обучающей выборке во время обучения показаны на рис. 9. Функция потерь и точная скорость этого КГНС как на обучающем наборе, так и на тестовом наборе после обучения показаны в табл. 1. Она показывает, что, когда количество выборок достигает 1000, мы можем обучить КГНС с высокой производительностью.

ТАБЛИЦА 1. АНАЛИЗ НАБОРОВ ДАННЫХ, ПОТЕРЬ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ

Тренировочный набор		Тестовый набор		
Число выборок	Потери	Точная скорость	Потери	Точная скорость
100	0.15542687722068718	90.36%	0.15639276595744667	90.17%
1000	0.03284751330438213	98.32%	0.0294211153664303	98.91%
10000	0.020227478326095588	98.92%	0.017112455910165428	99.39%
∞	0.015732338671740852	98.92%	0.013040602800738285	99.57%

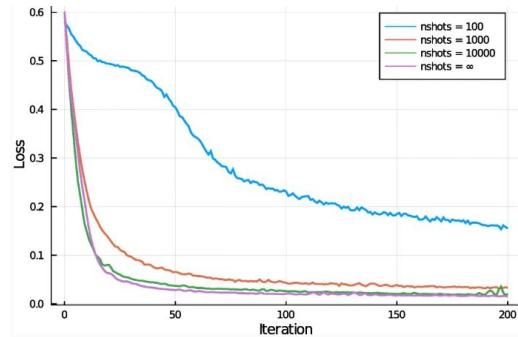


Рис. 9. Функция потерь

Доказали, что КГНС обладают большей представительной способностью, чем классические ГНС. Представили практический алгоритм обучения на основе градиента как аналог алгоритмов БП. В результате КГНС по-прежнему сохраняет большинство преимуществ классических ГНС. Поскольку модель основана на гибридной квантово-классической схеме, она может быть реализована на процессорах ЗКПМ. Поскольку для квантовых вычислений используем классический симулятор на настольном ПК, можно использовать только КГНС с небольшим количеством кубитов и можно продемонстрировать только простые примеры. Квантовое оборудование быстро развивается. Google добился квантового превосходства, используя сверхпроводящий квантовый процессор с 53 кубитами. Однако из-за отсутствия доступа к реальному квантовому компьютеру не можем провести имитационные тесты того, как КГНС работает с шумами. Имея ресурсы квантовых вычислений, можем получить доступ к гильбертовым пространствам с экспоненциальной размерностью с помощью КГНС и использовать только параметры полиномиального размера.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-01082.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Ляпунцова Е.В., Потапов В.С. Основы теории построения квантовых компьютеров и моделирование квантовых алгоритмов: монография. – М.: Физматлит; Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 285 с. ISBN 978-5-9221-1792-0.
- Потапов В.С., Гузик В.Ф., Гушанский С.М. Реализация программной модульной модели квантового вычислителя // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности: сборник статей I Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С.121-124.
- Алтайский М.В., Капуткина Н.Е., Крылов В.А. Квантовые нейронные сети: современное состояние и перспективы развития // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2014. – № 5–6. – Т. 45. – С. 1825–1860.
- Altaisky M.V., Zolnikova N.N., Kaputkina N.E., Krylov V.A., Lozovik Yu.E., S. Dattani Nikesh. Entanglement in a quantum neural network based on quantum dots. – URL: <http://arxiv.org/pdf/15542412.01141v1.pdf> (дата обращения: 20.03.2021).
- Behrman, E.C. A Quantum Neural Network Computes Entanglement / Chandrashekhar V., Wang Z., Belur C.K., Steck J.E. – URL: <http://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/quantum-450202/0202131.pdf> (дата обращения: 20.03.2021).

6. *Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M.* The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes // 2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. – P. 437-441.
7. *Phillips D.E., Elelschnauer A., Mair A., Walsworth P.L., Lukin M.D.* Storage of light in Atomic Vapor // Physical Review Letters. – Januar 2001. – Vol. 86, No. 05.
8. *Lukin Mikhail D.* Attractive photons in a quantum nonlinear medium // Ofer Firstenberg, Nature. – October 2013. – Vol. 502.
9. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Потапов В.С.* Исследование и разработка модели квантового вычислителя.. – LAP, LAMBERT, Academic Publishing, 2014. – 121 с.
10. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Касаркин А.В.* Методика построения модели квантовых вычислений с запутанностью. – LAP, LAMBERT, Academic Publishing, 2014. – 84 с.

Разработка интеллектуальной системы «Независимый умный помощник»

Ромашин Даниил Васильевич

Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказский

федеральный университет

Пятигорск, Россия

ddddd1.9@mail.ru

Аннотация. В данном докладе описывается способ решения проблемы полноценного отдыха и культурного досуга людей с инвалидностью по зрению, а именно разработка и создание программного обеспечения «Независимый Умный Помощник» и его использования в условиях курортов Ставропольского края Российской Федерации. В проекте предлагается способ создания единой информационной системы с использованием нейронных сетей, для облегчения выполнения самостоятельных действий людьми с ограниченными возможностями по зрению, путем взаимодействия с датчиками движения и модулями GPS.

Annotation. This report describes a way to solve the problem of good rest and cultural leisure for people with visual disabilities, namely, the development and creation of the "Independent Smart Assistant" software and its use in the resorts of the Stavropol Territory of the Russian Federation. The project proposes a way to create a unified information system using neural networks, to facilitate the performance of independent actions by people with visual impairments, by interacting with motion sensors and GPS modules.

Ключевые слова: цифровизация, люди с ограниченными возможностями, искусственный интеллект, санаторно-курортное лечение, безбарьерная среда, независимый умный помощник, программное обеспечение, искусственная нейронная сеть, сигмоидальная функция, датчики, интерфейс, GPS.

Keywords: digitalization, people with disabilities, artificial intelligence, spa treatment, barrier-free environment, independent smart assistant, software, artificial neural network, sigmoidal function, sensors, interface, GPS.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современных реалиях очень остро стоит создания комфортной и безбарьерной среды для людей с ограниченными возможностями. Существуют различные способы оказания помощи различным группам людей с инвалидностью для улучшения их повседневной жизни и культурного досуга. За счет усовершенствования и развития современных технологий и искусственного интеллекта открываются новые способы помощи различным группам граждан. На санаторно-курортное лечение и отды whole нашего Ставропольского края также приезжает большое количество маломобильных групп граждан, в том числе и инвалиды по зрению. В данном проекте предлагается создание ПО направлена на поддержку слабовидящих людей и инвалидов по зрению, а также пожилых людей и маленьких детей путем создания интеллек-

туальной информационной системы «Независимый Умный Помощник» (НУП). Создание данного проекта также подпадает под указы президента Российской Федерации о развитии: культуры, цифровизации населения, качественных услуг, безбарьерной среды.

Главная цель проекта «Независимы Умный Помощник» помочь людям с особенностями по зрению, тем самым упростить многие действия, которые даются им с трудом без посторонней помощи, тем самым сохранив их личные границы. К каждому пользователю данной системы будет индивидуальный подход.

II. НЕЙРОННАЯ СЕТЬ

В данном проекте предлагается использовать современные технологии, а именно - искусственная нейронная сеть (ИНС), являющейся основой информационной системы «Независимого Умного Помощника».

ИНС была создана более 40 лет назад, и в данный момент со стороны разработчиков непосредственно к ней направлено пристальное внимание, так как искусственная сеть делит некоторые физические и типы поведенческих аспектов биосетей. Фундамент структуры ИНС, которая есть параллельная система, является биологический нейронный процесс мозга человека, которая применяется при решении поставленных перед ней сложных задач, связи и процессы которых она пытается имитировать в математических наборах систем [1].

Как правило, для создания систем ИНС требуется как минимум три слоя - входной, скрытый и выходной. Число скрытых узлов, которые зависят от конкретной проблемы исследования и которые могут легко распространяться на более скрытые слои. На входе находятся узлы, соответствующие входным переменным, а на выходе – узлы, соответствующие выходным переменным [2].

Входной слой используется для распределения входов по нескольким скрытым слоям, выход которых соединен с выходным слоем, где выходы блоков соединены с входами следующего подключения. Проще говоря, взвешенные соединения позволяют передавать данные между слоями через него, где узел принимает данные из предыдущего слоя и вычисляет взвешенную сумму всех своих нетто-входов. В качестве активационной функции обычно используют сигмоидальную функцию (1) [7].

$$f(z) = \frac{1}{1 + \exp(-z)}. \quad (1)$$

Слово «сигмоид» относится к чему-то изогнутому в двух направлениях. Существуют различные сигмоидные функции, и нас интересует только одна. Она называется логистической функцией, и ее математическое выражение довольно просто. Согласно функции, код программы выглядит так:

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
x = np.arange(-8, 8, 0.1)
f = 1 / (1 + np.exp(-x))
plt.plot(x, f)
plt.xlabel('x')
plt.ylabel('f(x)')
plt.show()
```

В данном проекте нейронная сеть является основным модулем, так-как в поставленных для нее задачах, должна выполнять точные действия и одновременно прогнозировать дальнейшие действия пользователя НУП.

Во время процесса разработки данного проекта будет уделено большое внимание точности и вариации ответов на поставленные задачи непосредственно пользователем, точность запросов и так далее. Возможно, что часть принимаемой информации не получится обработать самой интеллектуальной системой непосредственно на устройстве или в цифровом облаке, поэтому при дополнительной нагрузке придется контролировать сотруднику курортно-оздоровительного учреждения.

III. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА «Независимый Умный Помощник»

Данный проект позиционирует себя как цифровое оригинальное приложение, со встроенным голосовым ассистентом, обрабатывающее полученную информацию за счет алгоритмов нейронной сети.

Также НУП ставит перед собой цель, помимо помочь людям с особенностями по зрению, упрощая им жизнь, а также помочь сотрудникам курортно-оздоровительных учреждений, на базе которых планирует использовать данный продукт, путем внедрения современных технологий в виде устройств геопозиционирования, использующих возможностей GPS (Глонасс), датчиков движения, мобильных устройств.

«Независимый Умный Помощник» в виде приложения может быть установлен на такие устройства, как смартфоны, умные часы, голосовую станцию [8].

Вариант использования комплекса НУП: отдыхающий хочет выполнить самостоятельную прогулку, непосредственно от места жительства, до культурного объекта и возвратится обратно в свой номер. Для этого он использует устройство в виде часов или смартфона, давая голосовой запрос. За счет разделения информации с помощью нейросетевой обработки выстраивается маршрут и происходит связь с сотрудником санатория

или пансионата. Также происходит связь с датчиками движения и GPS, которые будут сопряжены в единую сеть с отдыхающим, помогут ему ориентироваться в пространстве и передавать культурно-справочную информацию непосредственно о месте, в близи которого он находится.

Навигация будет обеспечиваться превентивное отслеживание отдыхающего (экспурсанта) с рекомендациями дальнейшего движения, что является новизной прилагаемой идеей. Звуковое сопровождение может выполняться как по средством встроенного динамика, так и с помощью проводной-беспроводной гарнитуры. При экстренной ситуации звуковое сопровождение полностью переводится на свободного сотрудника/оператора, для дальнейшего контроля действий отдыхающего и направлением его в правильном направлении [6].

IV. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТКИ

Проект «Независимый Умный Помощник» может быть использован не только на курортах и городской среде Ставропольского края, но и в других регионах и областях Российской Федерации. За счет гибкости разрабатываемого интерфейса НУП может быть использован для удобства жизни как пожилых людей, так и детей, помогая обеим группам населения при безопасном перемещении[3].

Также НУП может быть использован в помощи иностранным туристам, которые выбрали Ставропольский край, как место своего отдыха, путем перевода интерфейса и культурной программы на английский язык, помогая им узнавать больше о не самых известных, но значимых культурных местах нашего края.

Потенциал данного проекта заключается в непосредственном создании его фундаментальной системы, отладки процесса и функционала, дизайна, внедрения нейронных сетей, а также верстка и отладка (самого интерфейса приложения и взаимодействия с ним) непосредственно самим автором идеи. Положительное стечание обстоятельств, при удачной реализации первого этапа НУП поможет при развитии его комплекса, путем стимулирования развития технологического кластера и разработки систем микроэлектроники внутреннего производства, тем самым запустив процесс импортозамещения, который поможет решить вопрос при дальнейшей реализации проекта в совокупности в других областях.

Проект может быть реализован в установленные ограниченные сроки времени. В течении временного периода одного года будут аппаратные инфраструктуры и реализована разработка программных методов [5].

«Независимый Умный Помощник» предполагается выполнять в следующей последовательности: разработка собственного приложения, в том числе и мобильного с поддержкой голосового интерфейса – «Независимый умный помощник», пакет которого может установлен и использоваться на умных устройствах – смартфонах, умных часах, голосовых станциях. Также пакет программного обеспечения НУП может быть запущен на персональном компьютере. Второй шаг заключается в привязке и использования в помещения и в сложных уличных маршрутах датчиков движения с функцией голосового оповещения при прохождении пользователь

НУП непосредственно в близи от них, при правильной координации и положения в пространстве. Также в данных датчиках должна присутствовать технология GPS (Глоннакс), для более точного отслеживания местоположения и выполнять функцию передачи исторической информации о городе и месте. Данный этап является довольно сложным, так-как требует непосредственной привязки всех элементов ПО «Независимого Умного Помощника» и датчиков, а также отладки работы систем навигации и голосового информационного интерфейса. Навигация будет непосредственно подаваться с помощью голосовых сообщений. За счет этого проекта будет выполнена программа по формированию безбарьерной среды для людей с ограниченными возможностями (незрячие и слабовидящие) путем разработки интеллектуального сервиса «Независимый Умный Помощник». При удачном старте и развитии НУП, может происходить интеграция системы в современные цифровые системы и пространства городских муниципалитетов [4].

При создании проекта будет учтен вопрос по продолжительности, культурной насыщенности и удобства того или иного маршрута, так как от этого зависит безопасность отдыхающих, и впечатления от самой прогулки.

Стоит также учесть вопрос расположения датчиков, для полноценной работы НУП и контроля отдыхающего. Сами маршруты могут быть разнообразны, в зависимости от ситуации. Культурно-историческая программа будет проработана непосредственно со специалистом.

V. АНАЛОГИЧНЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время существует множество голосовых ассистентов, использующие в своей основе нейронные сети и машинное обучение, а также набор заданных команд. Как пример, разработки российской компании «Яндекс», использующие в своей работе непосредственно взаимодействия с нейронной сетью и обучению при взаимодействии с пользователем.

Из международных сервисов компании Google, которые также выполняют поставленные перед ними задачи за счет развитых баз.

Также стоит привести пример отечественной информационной системы «Умный Город» в городе Железнодорожске, как «цифрового посредника» между жителем города и информацией о элементах городской экосистемы, как например, нахождение транспорта, информация о мероприятиях и так далее.

VI. ЗАТРАТЫ НА ПРОЕКТ

«Независимый Умный Помощник» является экспериментальным проектом, поэтому затраты на его реализацию могут быть весьма весомы. Варианты для поступления для реализации данного проекта могут быть: взаимодействие с компанией «Яндекс», как лидером разработки российской ИТ-сферы. Также за счет того, что проект может быть реализован за счет средств бюджета, фондов, грантовой поддержки, при включении в программу «Умный Город» и «Безбарьерная Среда».

В дальнейшем затраты на данный проект могут быть покрыты за счет увеличения потока отдыхающих средствами курортного сбора[8].

VII. ПРИОРИТЕТЫ ДЛЯ РЕГИОНА

За счет привлечения отдыхающих с особенностями по зрению данный проект сможет улучшить привлекательность Ставропольского края как удобного, безбарьерного курорта, что позволит привлечь больше туристов, тем самым улучшить показатель бюджетных поступлений, развивать и создавать комфортную и удобную городскую среду.

Непосредственно сам «Независимый Умный Помощник» может стать примером способности региона к созданию современных и социально значимых цифровых и технологичных продуктов.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тенденция современного мира требует создания современных подходов для поставленных целей и задач. Улучшение качества жизни людей, с особенностью здоровья и их беспроблемная жизнь в обществе на равных со всеми может быть частью национальной идеи. Данный проект дает людям с ограничением по зрению возможность самостоятельно провести свой досуг без посторонней помощи, тем самым размыв сложившиеся рамки. За счет реализации подобных проектов, появляется и потребность в развитии иных отраслей, помимо социального и культурного вопроса. Развитие рынка программного обеспечения и непосредственно создание полноценной нейронной системы в виде алгоритма «Независимого Умного Помощника», так и требования к созданию микроэлектроники в виде простейших датчиков и средств геопозиции, что, безусловно дает развитие региона и государству в современном мире, так-как человеческий ресурс и потенциал в высокотехнологичных идеях играет на данный момент важнейшую роль в мировом и развитом обществе.

Также данный проект является молодежной идеей, а значит подобные проекты доказывают о значимости поддержки подобных инициатив для улучшения взаимоотношения между разработчиком и административным ресурсом, принося тем самым пользу для людей и страны.

Все это говорит о том, что данный проект охватывает множество сфер, развитие которых очень важно для нашей страны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николенко Сергей Игоревич, Каудрин А.А. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. – СПб.: Изд-во Питер, 2020. – 480 с.
2. Массарон Лука, Мюллер Джон Поль.. Искусственный интеллект для чайников. – М.: Изд-во Вильямс, 2019. – 384 с.
3. Смирнова Елена Викторовна, Пролетарский Андрей Викторович. Технология современных беспроводных сетей Wi-Fi. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 448 с.
4. Олифер Виктор Григорьевич, Олифер Наталия Алексеевна. Компьютерные сети // Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Изд-во Питер, 2020. – 1008 с.
5. Таненбаум Эндрю, Уэзеролл Дэвид. Компьютерные сети. – СПб.: Изд-во Питер, 2019. – 960 с.
6. Хайкин Саймон. Нейронные сети. – М.: Изд-во Вильямс, 2019. – 1104 с.
7. Рашид Тарик .Создаем нейронную сеть. – М.: Изд-во Вильямс, 2018. – 272 с.
8. Вигерс Карл И., Битти Джой. Разработка требований к программному обеспечению – СПб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2019. – 736 с.

Цифровая трансформация как эволюционный шаг развития автоматизации технологических процессов

Сидельников Владимир Иванович
Высшая школа технологии
и энергетики СПбГУПТД
Санкт-Петербург, Россия

Чагаев Антон Владимирович
Высшая школа технологии
и энергетики СПбГУПТД
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Цифровая Трансформация – это эволюционный переход от автоматизированного управления процессов к автоматическому, где люди переходят на вторые, третьи и другие вспомогательные роли. Средства автоматизации технологических процессов являются предпосылками для реализации автоматического управления. Все поставщики, предлагающие технические решения и усовершенствования, делятся по двум подходам: *InformationTechnology* и *OperationTechnology*.

Annotation. Digital Transformation is an evolutionary transition from automated process control to automatic control, where people move to second, third and other auxiliary roles. Process automation means are the pre-conditions for implementing automatic control. All suppliers offering technical solutions and improvements are divided into two approaches: *Information Technology* and *Operation Technology*.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, Цифровая Трансформация, Автоматизация будущего, автоматизация технологических процессов, системы Advanced-ProcessControl.

Keywords: Industry 4.0, Digital Transformation, Future Automation, Automation of technological processes, Advanced Process Control Systems, Process Automation.

Цифровая Трансформация – это эволюционный переход от автоматизированного управления процессов к автоматическому, где люди переходят на вторые, третьи и другие вспомогательные роли. Западные футуристы уже сейчас отмечают общую тенденцию алгоритмизации всех процессов, существующих в обществе от промышленного производства, юриспруденции, медицины, торговли до бытовых коммуникаций. Дальнейший рост алгоритмизации напрямую связывается с дальнейшим техническим и технологическим прогрессом.

Целью работы является исследовать возможные пути дальнейшего эволюционного развития функционала средств автоматизации технологических процессов в мире Цифровой Трансформации на базе целлюлозно-бумажного предприятия.

В данной статье были поставлены следующие задачи:

1. Ввиду многогранности понятия Цифровая Трансформация, разобраться в его определении;

2. Описать типовую структуру средств автоматизации в настоящее время;

3. Проанализировав современный рынок, описать возможные перспективы по дальнейшей эволюции функционала средств автоматизации.

В настоящее время в разной литературе используются разные термины, основные из которых Цифровая Трансформация Индустрия 4.0. Важно отметить, что до сих пор все определения Индустрии 4.0 сформулированы недостаточно точно. В настоящее время можно определенно рассуждать лишь о Цифровой Трансформации как о первоначальном этапе реализации идей Индустрии 4.0. Дальнейшее эволюционное развитие, безусловно, расставит все по своим местам и даст не только точное определение всех понятий, но и позволит создать единую концепцию организации любого производственного процесса с опорой на технологии Индустрии 4.0.

Точно такой же процесс осмыслиения и развития не так давно мы все наблюдали при появлении компьютеров. На этапе создания механических машин на паровой тяге или на вакуумных электронных лампах сложно было рассуждать об их назначении даже самым продвинутым умам. Сейчас же огромное количество смелых и местами безумных идей уложилось в понятный и полезный функционал, который известен даже детям.

Концепцию Индустрии 4.0 впервые сформулировал в 2011 году Клаус Шваб (президент Всемирного экономического форума) в Давосе [2].

Клаус Шваб в четвертой промышленной революции увидел глобальные изменения человечества, в этой революции больше изменяются не продукты, а сами люди и соответственно весь мир.

Индустрия 4.0 приведет к массовым внедрениям киберфизических систем в производстве, к автоматизации большинства производственных процессов, наделению устройств искусственным интеллектом и внедрению многих других современных технологий. Все это существенно сказывается на повышении производительности и снижении себестоимости продукции.

Теперь сформулируем понятие цифровой Трансформации. Это понятие не устоялось, и имеет значительную вариацию различных определений, зачастую не имеющих ничего общего друг с другом.

На сайте сообщества ИТ-директоров "Enterpriseproject" дается следующее определение: Цифровая Трансформация — это интеграция цифровых технологий во все сферы бизнеса, кардинально меняющая вашу деятельность и приносящая пользу клиентам, а также культурные изменения, которые требуют от организаций постоянно оспаривать статус-кво, экспериментировать и чувствовать себя комфортно в случае неудачи [16].

Сформулировав определение цифровой Трансформации, вернемся к автоматизации на промышленных предприятиях. В настоящее время для автоматизации используют комплекс различных средств, начиная от полевых датчиков и исполнительных устройств, и заканчивая системами управления предприятием. Опишем на простой модели основной принцип работы.

Датчики, установленные на бумагоделательных машинах, получают информацию о состоянии процесса и о качестве бумажного полотна, и передают ее на систему DCS (Distributed control system). Данная система обрабатывает полученную информацию, и передает команды на исполнительные устройства для управления существующим процессом и поддержания необходимых параметров в соответствии с существующим алгоритмом управления и управляющими действиями оператора.

Основное преимущество существующего автоматизированного режима управления заключается в том, что рутинные операции делегируются системе управления. В результате, на предприятии значительно снижаются затраты на сырье, количество обрывов полотна, а также повышается качество готовой продукции и производительность всего потока.

Тем не менее, существуют и несколько серьезных недостатков:

1. Прежде всего, за процессом все равно продолжает следить человек. В итоге какая-то часть оборудования может работать в ручном режиме.

2. Кроме того, из-за большого транспортного запаздывания в технологической цепочке и невозможности отслеживать прямые зависимости качественных показателей готовой продукции от технологического режима, автоматизированное управление не позволяет полностью передать управление компьютеру. Опыт человека дополняет функционал автоматизированной системы управления.

3. Также на предприятии в среднем работают 4 смены операторов. Каждая смена настраивает работу потока в соответствии со своими представлениями, что приводит к тому, что несколько раз в сутки на предприятии может меняться стратегия управления производством.

Получается, что одним из главных недостатков современного автоматизированного управления является то, что процессом управляет человек. Цифровая Трансформация нацелена на исправление данного недостатка. В идеальной ситуации Цифровая Трансформация подразумевает под собой внедрение алгоритма, который самостоятельно управляет и координирует работу на

предприятии, в компании или группе компаний в целом. Однако развитие технологий на данный момент не позволяет полностью делегировать процесс управления предприятием алгоритму. Тем не менее многие компании-поставщики оборудования и решений уже сейчас могут предложить системы, которые смогут приблизить предприятия к Цифровой Трансформации.

Все поставщики, предлагающие технические решения и усовершенствования для целлюлозно-бумажной промышленности, делятся по двум подходам: Information Technology (революционный) и Operation Technology (эволюционный) [13, с. 12].

Особенностью эволюционного подхода является то, что данный путь полностью или в какой-то существенной степени использует уже существующую работающую автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП), в результате чего появляется возможность проверять эффективность внесенных дополнений и корректировать дальнейший путь. Отсюда следует, что внесение всех улучшений осуществляется постепенно, с полным контролем работы и ясным видением дальнейшего пути.

Революционный подход подразумевает под собой внедрение новой системы управления с нуля. В таком случае строится новая, параллельная система управления с уже внедренной на предприятии АСУТП (если таковая существует). Основной особенностью данного подхода является то, что система управления начинает строиться "сверху", начиная с облачных технологий, и заканчивая установкой датчиков "в поле" (то есть на самом технологическом оборудовании). Отсюда следует, что у предприятия нет возможности проверить эффективность новой системы оптимизации и управления до тех пор, пока она не будет полностью развернута на комбинате.

К революционному подходу относятся такие компании как Andritz, IBM и SAP. Они используют оборудование и устройства ОТ компаний и внедряют свой софт для управления предприятием. Эволюционный подход предлагают свои заказчикам Valmet, Voith, Siemens и ABB.

При этом, например, целлюлозно-бумажная промышленность является полем деятельности (corebusiness) для таких компаний, как Valmet, Voith и Andritz.

В настоящее время все существующие технические решения можно объединить в пять ключевых элементов, наличие каждого из которых является важным для трансформируемого предприятия:

- Системы распределенного управления DCS;
- Системы APC (Advanced Process Control), управление по прогнозу [1, с. 76];
- Решения по обеспечению надежности работы оборудования;
- Сервисные услуги по удаленной поддержке клиентов по технологическому процессу;

- Программная платформа обеспечения сотрудничества вендоров для поддержания технологического процесса (экосистема).

Под системами распределенного управления подразумеваются системы АСУТП, напрямую соединенные с датчиками и управляющими элементами (актуаторами) для контроля и управления работой оборудования. Такие системы в обязательном порядке должны обеспечивать гарантированный отклик на событие (операционные системы реального времени).

Каждая ОТ компания так или иначе имеет свою распределенную систему управления (DCS). Однако ИТ компании таких решений не имеют и используют системы третьих компаний, например, Valmet, Siemens или ABB.

Advanced Process Control – это система оптимизации, которая позволяет управлять каждым процессом предприятия в режиме реального времени, прогнозировать ожидаемые целевые показатели оперативно управляет технологическим процессом.

Как правило работа пакетов оптимизации APC строится на базе специализированных измерений качественных показателей продукции. Анализаторы выполняют задачу этих специализированных измерений. Для того, чтобы получить полную информацию о полученном продукте, его отправляют на анализ в лабораторию при предприятии. Однако такой анализ может занимать до получаса, и до конца проведения анализа не понятен полученный результат.

Обеспечение надежности подразумевает под собой мониторинг состояния оборудования и своевременная замена изношенных или сломанных деталей. Такие системы помогают анализировать, прогнозировать, планировать и устранять не только текущие проблемы, но и те, которые могут возникнуть в будущем в связи с износом оборудования. В результате предприятие снижает риск внезапной остановки цикла производства, а, следовательно, и потери прибыли.

Поддержка клиентов – это еще один значительный элемент Цифровой Трансформации. После того, как на предприятии были внедрены новые алгоритмы, их постоянно необходимо поддерживать и улучшать. Также необходимо обучить персонал предприятия работе с новыми внедренными системами.

Помимо этого, поддержка клиентов по технологическому процессу подразумевает под собой удаленную поддержку, мониторинг и анализ данных, а также доступ к сети экспертов по технологическому процессу.

Последний элемент, экосистема, подразумевает под собой объединение вендоров, вовлеченных в процесс производства для совместной работы в единой системе. Например, заказчик и поставщики имеют общую платформу для обмена данными и анализа работы оборудования.

Был проведен анализ компаний и составлена таблица (табл. 1) по критериям на основе вышеприведенных ключевых элементов. Значение «+» означает, что данный элемент реализован и предлагается компанией. Значение «-» означает, что компания не имеет своей собственной разработки данного элемента на рынке услуг. Значение «Нет данных» означает, что информация о наличии или отсутствии данного предложения в компании отсутствует в открытом доступе.

Таблица 1. Сравнение компаний по ключевым элементам

Критерии оценки	Operation Technology				Information Technology		
	Valmet	Voith	Siemens	ABB	Andritz	IBM	SAP
DCS	+	+	+	+	-	-	-
QCS	+	+	-	+	-	-	-
MCS	+	+	+	+	-	-	-
APC	Решение для каждого технологического передела	Решение для каждого технологического передела	Оптимизация общего вида	оптимизация общего вида	оптимизация общего вида	оптимизация общего вида	оптимизация общего вида
Визуализация	Dashboard	OnCinnus	Нет данных	Нет данных	Под заказ	Под заказ	Под заказ
Анализаторы	+	Soft-сенсор	Нет данных	Датчики концентрации	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Надежность	Мониторинг состояния: любого типа оборудования, контуров управления	Мониторинг состояния: любого типа оборудования, контуров управления	Жизненный цикл электротехнического оборудования	Жизненный цикл электротехнического оборудования	-	-	-
Поддержка клиентов по технологическому процессу	+	+	-	-	+	-	-
Экосистема	+	+	-	-	Нет данных	-	-

Из таблицы можно сделать вывод, что относительно целлюлозно-бумажной промышленности компании, специализирующиеся на ОТ подходе, могут предложить значительно больше элементов Цифровой Трансформации, нежели компании ИТ. Это обусловлено прежде всего тем, что ИТ компании больше сосредоточены на разработке программного обеспечения, а оборудование закупают у третьих компаний. Также ИТ компании имеют значительно более широкую сферу деятельности, что не позволяет им специализироваться исключительно в одной области.

ОТ компании, в свою очередь, обладают всем необходимым оборудованием, и, зачастую, значительно большими знаниями в области технологии, что позволяет им избегать ошибок и эффективно устранять все неисправности и уязвимые места системы.

В заключение можно сказать, что в будущем автоматизация эволюционирует. Человеческий фактор в настоящее время является одним из самых главных проблем при работе предприятия. Цифровая Трансформация нацелена на устранение данного недостатка и на изменение принципа работы предприятия. В настоящее время человек стоит над алгоритмом работы. Цифровая Трансформация поставит человека и алгоритм на один уровень. Внедрение Цифровой Трансформации может проходить с помощью двух основных подходов: Information Technology и Operation Technology. ИТ подход эффективен в случае отсутствия базовой системы управления АСУТП, а также необходимости контроля и принятия решений непосредственно на предприятии. ОТ подход может использоваться при наличии системы управления АСУТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизация от Metso. – М.: Лига-Принт, 2017. – 140 с.
2. Байден в Давосе предупредил человечество об угрозе потерять душу / РБК. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/politics/20/01/2016/569fd32c9a7947181f2c4fa1>.
3. Корпорация Илим Палп. Формула Целлюлозы. – Наука и Техника, 2007. – С. 38-47.
4. Несторенко Е.А., Козлова А.С. Направления развития Цифровой экономики и Цифровых технологий в России // Экономическая безопасность и качество. – 2018. – №. 2 (31).
5. ABB / ABB. – Режим доступа: <https://new.abb.com/>.
6. Discoverourbusiness / AndritzGroup. – Режим доступа: <https://www.andritz.com/group-en>.
7. Inspiring Technology for Generations / Voith. – Режим доступа: <http://voith.com/corp-en/index.html>.
8. Siemens / Siemens. – Режим доступа: <https://new.siemens.com/us/en.html>.
9. Sohail Nazari. Things you should know about The Industrial Internet of Things (Industrial IoT) // Andritz. – 2018. – С. 12.
10. Technologies, Services and Automation For / Valmet Forward. – Режим доступа: <https://www.valmet.com/>.
11. Turn your challenges into opportunities / SAP. – Режим доступа: <https://www.sap.com/index.html>.
12. What is digital transformation? / The Enterprisers Project. – Режим доступа: <https://enterprisersproject.com/what-is-digital-transformation#q1>;
13. Your sales team runs on trust/ IBM. – Режим доступа: <https://www.ibm.com/us-en/>.

Применение MATLAB для проектирования двухуровневой системы управления двигателем постоянного тока

Коробейников Анатолий Григорьевич
Факультет безопасности
информационных технологий
Университет ИТМО СПбФ ИЗМИРАН
Санкт-Петербург, Россия
Korobeynikov_A_G@mail.ru

Мунтян Евгения Ростиславна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ermuntyan@sfedu.ru

Заколдаев Данила Анатольевич
Факультет безопасности
информационных технологий
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
d.zakoldaev@mail.ru

Грищенцев Алексей Юрьевич
Факультет безопасности
информационных технологий
Университет ИТМО
Санкт-Петербург, Россия
agrishentsev@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлена одна из возможных процедур автоматизированного проектирования двухуровневой системы управления двигателем постоянного тока с использованием системы MATLAB. Основной целью данной работы является демонстрация удобства использования такого мощного и широко применяемого инструментария как MATLAB. Для достижения цели был представлен практический пример процедуры автоматизированного проектирования двухуровневой системы управления двигателем постоянного тока с требуемыми параметрами.

Annotation. This paper presents one of the possible procedures for the automated design of a two-level DC motor control system using the MATLAB system. The main purpose of this work is to demonstrate the ease of use of such a powerful and widely used toolkit like MATLAB. To achieve the goal, a practical example of a computer-aided design procedure for a two-level DC motor control system with the required parameters was presented.

Ключевые слова: MATLAB, автоматизированное проектирование, система управления, математическая модель, двигатель постоянного тока, система обыкновенных дифференциальных уравнений.

Keywords: MATLAB, automated design, control system, mathematical model, dc motor, ordinary differential equations system.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время MATLAB является одной из самых известных и мощных систем, применяемых для решения задач в различных предметных областях [1–3]. В данной работе рассматривается применение MATLAB для разработки и анализа двухуровневой системы управления двигателем постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ). Такие двигатели применяются в системах управления некоторых видов телескопов.

Работа выполнена в рамках проекта: Многоуровневое управление сложными техническими системами. НИР 12441.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Математическая модель (ММ) управления ДПТ НВ представляет из себя систему обыкновенных дифференциальных уравнений для электрической и механической частей и имеет следующий вид (ссылка):

$$\begin{cases} L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + e(t) = u(t), \\ J \frac{d\omega(t)}{dt} = M - M_C \end{cases}, \quad (1)$$

где $M = C_M \cdot \Phi \cdot i(t)$;

C_M – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом;

$i(t)$ – ток якоря;

Φ – поток, созданный обмоткой возбуждения;

$e(t) = C_\omega \cdot \Phi \cdot \omega(t)$ – электродвижущая сила (ЭДС) якоря;

C_ω – коэффициент связи между угловой частотой вращения и ЭДС;

$\omega(t)$ – угловая частота вращения вала ДПТ НВ;

$u(t)$ – напряжение на якорной обмотке двигателя;

M – электромагнитный момент двигателя;

$M_C = K_f \omega(t)$ – момент сопротивления движению;

K_f – коэффициент вязкого трения;

R – активное сопротивление якорной цепи;

L – индуктивность якорной цепи;

J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки.

Первое уравнение в (1) отражает взаимосвязь между переменными в цепи якоря, а второе – условия механического равновесия. В данной ММ входными воздействи-

виями будут служить напряжение якоря $u(t)$ и момент сопротивления движению M_C , а выходными переменными служат электромагнитный момент двигателя M и угловая частота вращения вала ДПТ НВ $\omega(t)$. Обобщенными координатами будут служить ток якоря $i(t)$ и угловая частота вращения вала ДПТ НВ $\omega(t)$. Все остальные оставшиеся переменные будут являться параметрами ММ: $R, L, K_f, J, C_\omega, C_M$.

Для представления (1) в пространстве состояний представим ее к виду:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i(t) = -\frac{R}{L} \cdot i(t) - \frac{C_\omega \cdot \Phi}{L} \omega(t) + \frac{1}{L} u(t) \\ \frac{d}{dt} \omega(t) = \frac{C_M \cdot \Phi}{J} \cdot i(t) - \frac{K_f}{J} \omega(t) \end{cases} \quad (2)$$

III. ПРИМЕНЕНИЕ MATLAB ДЛЯ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

При написании работы был применен MATLAB R2021a в компьютерной сети [4]. Для синтеза и анализа ММ управления ДПТ НВ НС в MATLAB необходимо задать численные значения параметров. Это можно сделать, например, следующим образом:

```
clc
clear
% Задание параметров двигателя
R = 2.0;
L = 0.6;
Km=0.16;
Kb=0.16;
J = 0.025;
```

Представим модель управления ДПТ НВ НС (2) в пространстве состояний:

```
% Создание модели управления ДПТ НВ НС в пространстве состояний (ss)
```

```
A = [-R/L - Kb/L; Km/J - Kf/J];
B = [1/L; 0];
C = [0 1];
D = [0];
sys_dc = ss(A,B,C,D);
```

Можно посмотреть передаточную функцию заданной таким образом системы. Для этого наберем команду:

```
tf(sys_dc)
```

Наша задача заключается в проектирование двухконтурной системы управления с обратной связью, минимизирующей время переходного процесса при поддержании запаса по фазе внутреннего цикла по крайней мере 65 градусов и с максимальной пропускной способностью внутреннего цикла.

В MATLAB можно выбрать архитектуру двухуровневой системы управления, содержащей внутренний и внешний цикл управления (рис. 1):

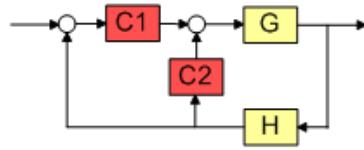


Рис. 1. Базовая архитектура двухуровневой системы управления, существующая в MATLAB

Здесь имеются:

- Внешний контур с компенсатором (C1) в прямом пути;
- Внутренний цикл с компенсатором (C2) в пути к обратной связи;
- Динамика датчика (H) в пути к обратной связи.

Для решения вышеобозначенной задачи такая архитектура не подходит, но ее можно легко модифицировать. Добавим на схеме рис.1:

– к выходу объекта управления G (ДПТ НВ НС) интегратор при помощи команды (последовательное соединение двух передаточных функций):
plant = sys_dc*tf(1,[1,0]);

– к входу C2 дифференциатор:
Cdiff = tf('s');

Воспользуемся инструментом Control System Designer. Его можно вызвать различными способами, например через вкладку App или при помощи вызова команды controlSystemDesigner.

Активируем Control System Designer. Выберем требуемую архитектуру (рис. 1) двухуровневой системы управления при помощи выбора 4 структуры во вкладке Edit Architecture. Далее перенесем данные из рабочей области в модель. Для этого в таблице Blocks справа нажмем клавишу добавить у объекта: - G и выберем plant; - C2 и выберем Cdiff. После принятия изменений появятся несколько графиков, таких как диаграмма Боде и переходной процесс. Для удобства дальнейшей работы можно закрыть несколько графиков: Root Locus Editor for LoopTransfer_C2 и Bode Editor for LoopTransfer_C1.

Настроим график диаграммы Боде для внутреннего цикла. Это связано с требованием первоочередности настройки внутреннего цикла. Для этого на вкладке View надо выбрать Single и далее выбрать Bode Editor for LoopTransfer_C2.

Увеличение пропускной способности внутреннего цикла регулируется при помощи изменения коэффициента усиления компенсатора C2. Для этого на вкладке Controllers And Fixed Blocks выбирается C2. Нажимаем правую клавишу “мышки” и выбираем Open Selection. В поле Compensator выбирается C2 и устанавливается значение 133. Дальнейшее увеличение усиления уменьшает запас по фазе ниже 65 градусов (рис. 2).

Для изоляции внутреннего цикла от остальной части архитектуры системы управления, необходимо произвести открытие цикла в отклике разомкнутого контура внутреннего цикла. Выберем LoopTransfer_C2 во вкладке Responses. Нажимаем правую клавишу “мышки” и выбираем Open Selection. Для добавления цикла, открывающегося при выходе компенсатора внешнего контура, C1, в диало-

говом окне Open-Loop Transfer Function, нажимаем на +Add loop opening location to list и выбираем uC1. Приложение добавляет цикл, открывающийся в указанном месте. Это устраняет влияние внешнего контура управления на передаточную функцию разомкнутого контура внутреннего цикла. Графики обновляются и выводится новая передаточная функция без обратной связи.

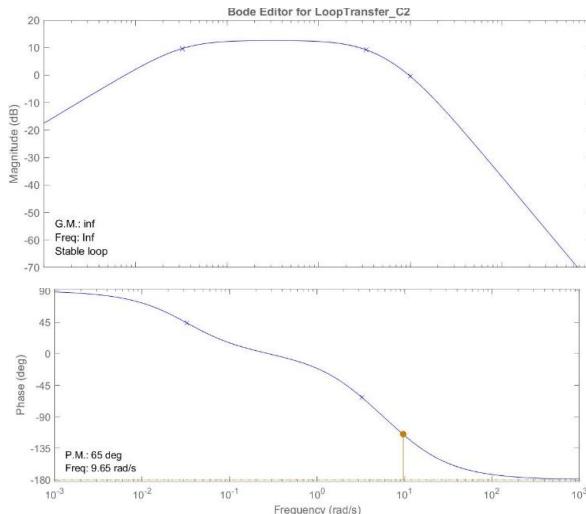


Рис. 2. Рассчитанная диаграмма Боде для внутреннего цикла

После настройки внутреннего цикла можно переходить к настройке внешнего контура с обратной связью с целью уменьшения времени перерегулирования.

Для удобства работы можно одновременно расположить графики Root Locus for LoopTransfer_C1 и IOTransfer_r2y_step. Кроме того, для визуального контроля текущего времени перерегулирования, нужно нажать правую клавишу “мышки” на графике и выбрать Characteristics> Settling Time. На рис. 3 видно, что текущее время перерегулирования ($C1=1$) больше 640 секунд.

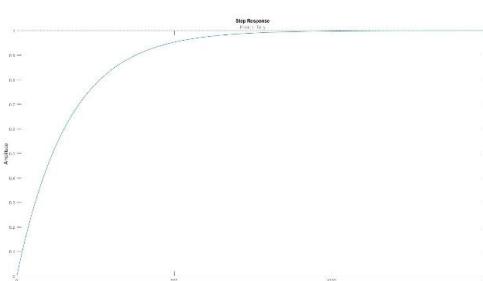


Рис. 3. Время перерегулирования $C1=1$

Увеличение усиления компенсатора С1 производится практически также, как и С2. Как видно из графика на рис. 4, значение С1 равное 810 является хорошим компромиссом между временем нарастания и временем перерегулирования.

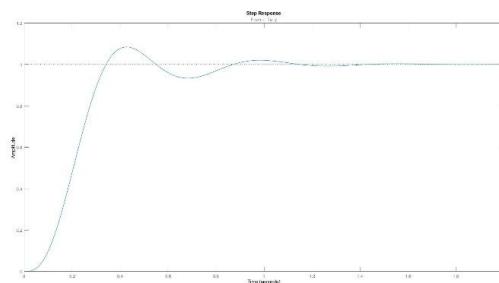


Рис. 4. Время перерегулирования при $C1=810$

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен инструментарий MATLAB, при помощи которого спроектирована двухуровневая система управления ДПТ НВ, обладающая временем перерегулирования ниже 0,85 секунд и запасом по фазе внутреннего цикла 6поз5 градусов. Но решение подобных задач в MATLAB возможно и при помощи других инструментов, например Simulink. Этот инструмент позволяет воспользоваться готовыми Simulink-моделями, например электродвигателей различных типов, применяемых для управления телескопами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Грищенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Разработка модели решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 2 (72). – С. 109-113. – https://ntv.ifmo.ru/ru/article/283/razrabotka_modeli_resheniya_obratnoy_zadachi_vertikalnogo_zondirovaniya_iionosfery.htm (дата обращения: 22.07.2021).
- Коробейников А.Г., Грищенцев А.Ю., Кутузов И.М., Пирожникова О.И., Соколов К.О., Литвинов Д.Ю. Разработка математической и имитационной моделей для расчета оценки защищенности объекта информатизации от несанкционированного физического проникновения // Кибернетика и программирование. – 2014. – № 5. – С. 14-25. – DOI: 10.7256/2306-4196.2014.5.12889. – URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=12889 (дата обращения: 22.07.2021).
- Коробейников А.Г., Федосовский М.Е., Алексанин С.А. Разработка автоматизированной процедуры для решения задачи восстановления смазанных цифровых изображений // Кибернетика и программирование. – 2016. – № 1. – С. 270-291. – DOI: 10.7256/2306-4196.2016.1.17867. – URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=17867 (дата обращения: 22.07.2021).
- Богатырев В.А. Надежность и эффективность резервированных компьютерных сетей // Информационные технологии. – 2006. – № 9. – С. 25-30.

Секция III

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

DOI: 10.18522/syssyn-2021-28

Методика классификации открытых источников данных о киберугрозах по отраслям промышленности

Абрамов Евгений Сергеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
abramoves@sfedu.ru

Туманов Денис Александрович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
dtumanov@sfedu.ru

Токарев Михаил Валерьевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
mtokarev@sfedu.ru

Хабаров Олег Петрович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
habarov@sfedu.ru

Аннотация. В этой статье проводится анализ и оценка некоторых общедоступных источников данных о киберугрозах. Приводится обзор основных понятий threat intelligence. Предлагается методика выбора источников данных для их систематического использования и интеграции в процессы обеспечения информационной безопасности компании с учётом отраслей промышленности, возможных сценариев использования и типов индикаторов компрометации. Представлены результаты анализа источников данных в соответствии с предложенной методикой.

Annotation This article analyzes and evaluates some publicly available cyberthreat data sources. A taxonomy is introduced to classify and compare these data sources based on the following parameters: proximity to standardized representation (STIX), access mode, completeness of the data provided, and an overall assessment of the value of the source. In addition, the article provides an overview and results of the methodology for selecting data sources for their systematic use and integration into the information security processes of a company, taking into account the industries, possible use scenarios and types of indicators of compromise.

Ключевые слова: анализ угроз, индикатор компрометации, источник.

Keywords: threat intelligence, indicator of compromise, feed.

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях быстрого развития киберугроз многие компании ищут более эффективные способы защиты своего бизнеса. Сбор данных о киберугрозах – практика не новая, но ещё недостаточно хорошо formalизованная. Она получила название Cyber Threat Intelligence (CTI). Целью CTI является обеспечение упреждающего обнаружения кибератак до того, как они будут осуществлены. Внедрение CTI в систему обеспечения информационной безопасности организации возможно как на основе комплексных proprietарных решений, так и с применением open-source решений. И те и другие решения широко используют открытые, публично доступные источники данных (feeds) о киберугрозах. Такая ситуация затрудняет принятие решения, какой поставщик услуг наиболее подходит в соответствии с требованиями корпоративных программ безопасности. Текущие подходы к оценке источников данных, как правило, используют такие же наборы ключевых показателей эффективности (KPI), как и для антивирусных средств или средств защиты периметра, не учитывая специфику оценки источников данных, релевантность предметной области и требования программы безопасности потребителя. При этом неверный выбор источников вызывает либо дополнительные расходы, либо пропуск ключевой информации об угрозах безопасности.

Очевидно, что решение практической задачи классификации и оценки источников данных о киберугрозах требует всестороннего анализа характеристик и зависимостей общедоступных источников. Как сказано выше, одной из частных задач является классификация источников по релевантности распространяемых данных для отдельных отраслей промышленности (индустрий), и разработка соответствующей методики.

Анализ источников показывает, что на сегодняшний день в исследованиях и на практике отсутствует исчерпывающий обзор характеристик и зависимостей общедоступных источников данных по киберугрозам.

Научные публикации по проблеме СТИ рассматривают эту проблему с самых разных сторон.

В работе [1] авторы анализируют технологии анализа угроз и делают акцент на проблеме отсутствия единого мнения о том, как их применять у поставщиков и потребителей данных. В статье также объясняется, почему организации неохотно делятся данными об угрозах. Делается вывод о необходимости стандартизированного представления информации об угрозах для автоматизированного анализа больших объемов данных от источников, которые часто неоднородны и избыточны. Оцениваются наиболее популярные открытые/бесплатные инструменты анализа угроз.

Авторы проекта Cyber Threat Intelligence - AlliaCERT [2] формулируют представление о СТИ и о имеющихся таксономиях, учитывая многочисленные источники, методы сбора, продолжительность жизни информации и то, кто потребляет полученные разведданные с целью классифицировать и провести различия между существующими видами СТИ, чтобы лучше их использовать. Показано, что одним из ключевых факторов для эффективного обмена информацией об угрозах между организациями является отношения доверия и заинтересованности в обмене информацией.

Сравнительный анализ методов совместного использования угроз выполнен в рамках программы Евросоюза Horizon 2020 [3]. В отчете рассматриваются несколько источников данных для систем обмена информацией об угрозах, разделенных на частные, доступные в рамках сообществ и публичные. Анализируются тип открытых данных (например, структурированные машиночитаемые или неструктурированные) и языки запросов, протоколы или сервисы, доступные для поиска данных.

В работе [4] проводится сравнительное исследование для выявления и изучения публичных источников данных СТИ. Кроме того, вводится таксономия для классификации и сравнения этих источников данных на основе следующих шести параметров: (1) тип информации, (2) интегральность, (3) своевременность, (4) оригинальность, (5) тип источника и (6) достоверность. Авторы указывают, что разнородность источников данных усложняет их интеграцию и использование в процессах управления информационной безопасностью.

Статья [5] приводит результаты разработки, развертывания и исследования функционирования в операционной среде энергетической компании pilotной платформы СТИ. Авторы поднимают вопросы использования

специфичных для энергетической отрасли механизмов обеспечения безопасности и индикаторов компрометации (англ. indicators of compromise, IoC).

Руководство [6] рассматривает прикладные вопросы ИБ-аналитики с точки зрения с эффективности и результативности. Показана связь между коэффициентом возврата инвестиций (англ. Return On Investment, ROI) и такими параметрами как скорость обнаружения событий ИБ и способы обработки инцидентов ИБ с применением СТИ.

Проблемы оценки качества данных от источников рассматриваются в работе [7]. Предлагается набор метрики для оценки наборов данных СТИ, относящихся к конкретному инциденту и расширение существующего инструментария анализа СТИ, чтобы сделать оценку качества прозрачной для аналитиков безопасности.

Серия технических отчетов компании Fireeye [8] приводит краткий обзор тактик, техник и процедур атакующих в разрезе некоторых отраслей промышленности.

В статье [9] предлагается подход к созданию качественной информации об угрозах на основе собранных OSINT-каналов, которая впоследствии может быть использована в защитной инфраструктуре, такой как SIEM. Подход, реализованный в платформе позволяет создать обогащенные IoC, которые позволили идентифицировать кибератаки, ранее невозможные при анализе индикаторов по отдельности.

Исследование [10] представляет методы распределенного взаимодействия данных для MISP, а также общую модель оценки для устаревающей информации, которая распространяется в сообществах MISP.

В статье [11] представлена платформа для сбора информации об угрозах (Enriched Threat Intelligence Platform, TIP) как расширения возможностей импорта, оценки качества и обмена информацией в существующих TIP. Одним из самых слабых мест в реальных системах обнаружения и мониторинга безопасности является получение данных из открытых источников (OSINT), а также способы обработки и нормализации такой информации, учитывая ее неструктурированный характер.

В диссертационном исследовании [12] рассматриваются методы, проблемы и результаты использования сети «dark web» в качестве источника данных СТИ.

В работе [13] приводится обзор типов и реализаций платформ для анализа киберугроз, включая архитектуру и методы работы с источниками данных.

II. Основные понятия THREAT INTELLIGENCE

Observables (Наблюдаемый процесс)

В кибербезопасности слово Observable относится к любому объекту (в рамках компьютера или сети) с отслеживанием состояния или измеряемому событию, который можно наблюдать. Примеры распространенных observables [3]:

- IP-адреса.
- MAC-адреса.
- Имена хоста.
- Файловые хэши.

- URL-адреса.
- Адреса электронной почты.
- Файлы.
- Пути к файлам.
- Биткойн-адреса.

Изолированный анализ observables не имеет большого смысла, потому что они не дают достаточной информации об угрожающей ситуации. Их нужно исследовать с учётом контекста, где они имеют соответствующее значение, так что их можно анализировать и обрабатывать.

Индикаторы компрометации

Индикаторы компрометации относятся к observables с контекстной информацией о кибербезопасности, подтверждающие наличие возможной угрозы или атаки. Когда атака имеет место, она всегда оставляет следы своей деятельности, которые могут быть возможными индикаторами компрометации.

Примеры типичных IoC: сигнатуры вирусов, шаблоны в файлах, нарушения сетевого трафика, или чрезмерное количество запросов на один и тот же файл.

Для организаций важно иметь хорошее управление индикаторами компрометации.

Есть несколько решений, которые пытаются решить проблему управления IoC, например OpenIOC. OpenIOC – это стандартный формат XML, разработанный Mandiant (сейчас поддерживается FyreEye) для описания, группировки и обмена индикаторами компрометации [2].

Примеры IoC:

- filename iocs – атрибуты файловой системы, которые являются результатом активности той или иной угрозы;
- hash iocs – MD5, SHA1 и SHA256 хэши вредоносных компонентов, которые присутствуют в системе после ее заражения;
- falsepositive hashes – список исключений MD5, SHA1 и SHA256 хэшей, которые при детекции соответствующих компонентов помечаются сканером как «ложное срабатывание».

На рис. 1 представлены основные IoC по типам информации.



Рис. 1. Основные IoC по типам информации

Источники (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. Как правило, фиды посвящены определенной области интересов.

Каналы 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. С другой стороны, платные каналы в большинстве случаев предоставляются конкретными специализированными компаниями. В этом случае компании несут ответственность за проверку фидов перед их распространением, поэтому они более точны [4].

Акторы угрозы

Актор (субъект) угрозы – это субъект, который несет ответственность за злонамеренный инцидент безопасности. Это может быть отдельный человек или организация. В СТИ акторы можно разделить на категории – внешний, внутренний или партнерский. С внешними акторами нет установленных отношений доверия, тогда как для внутренних или партнерских [3] такие отношения существуют.

Тактика, техники и процедуры

Тактика, техники (методы) и процедуры (ТТП) – это способы действия акторов угроз. Методы и процедуры описывают способ организации и управления атаками и инструменты, которые акторы используют для этого.

ТТП, вероятно, является одним из самых важных источников информации об угрозах. Знание того, как действует злоумышленник, позволяет организациям принимать меры и решения о методах, которые должны использоваться для защиты от нападения. ТТП от злоумышленников могут быть полученные из информации о предыдущих или текущих атаках или из отслеживания их активности в Интернет (форумы, социальные сети) [3, 8].

Инциденты и кампании

Инциденты – это отдельные события, которые влияют на безопасность организации и ставят под угрозу ее систему или данные. Инциденты могут быть вызваны людьми намеренно или случайно. Примерами инцидентов могут быть попытки получить доступ к системе или данным из неавторизованных источников или DoS-атаки [7].

Кампанией называется группа инцидентов, передаваемых общим субъектом угрозы с использованием определенных ТТП и для определенной цели.

Обычно инциденты достаточно очевидно относятся к одной и той же кампании, потому что они связаны друг с другом. Они происходят в один и тот же конкретный период времени и имеют оющий набор характеристик, таких как индикаторы компрометации или ТТП [3].

Платформа управления аналитикой угроз (Threat Intelligence Platforms)

TIP имеет возможность связывать различные типы объектов, которые могут быть связаны между собой, такие как индикаторы, акторы или инциденты. Эти платформы также облегчают задачу обмена аналитикой угроз. Тремя основными функциями TIP являются агрегирование, анализ и действия (Aggregation, Analysis and Action) [3].

- Агрегация: включает сбор, агрегирование и хранение аналитики угроз. Эти данные могут поступать как из внутренних, так и из внешних источников, таких как отчёты об инцидентах или фиды, и имеет разные форматы. ТПР должны иметь возможность импортировать и анализировать как структурированные, так и неструктурированные данные, и должны поддерживать несколько форматов, таких как CSV, XML, STIX, OpenIOC и т.д. Также важна автоматизация обработки фидов, чтобы не перегружать персонал обработкой данных [11].
 - Анализ: после агрегирования данных их необходимо проанализировать. Анализ должен быть выполнен автоматически для получения более быстрых результатов. В ходе этого процесса собранная информация проверяется и помещается в контекст. Это означает нахождение корреляций между различными индикаторами и создание ссылок, которые позволяют иметь четкое представление о ситуации для актора, связанного с инцидентом и ТПП [9]. ТПР облегчают визуализацию всей этой информации с помощью рейтингов, графика и графов.
 - Действия: это означает поддержку ответных мер. ТПР должны предлагать возможность интегрироваться с другими продуктами безопасности с помощью интерфейса прикладных программ (API). Интеграция облегчает общение с другими командами и улучшает реагирование на инциденты и сетевую защиту. Действия включают развертывание индикаторов, создание обратной связи с другими продуктами для получения точных показателей и распространения данных аналитики угроз [11].

На рис. 2 показана иерархия связей между различными типами IoC в рамках процедуры расследования инцидента.

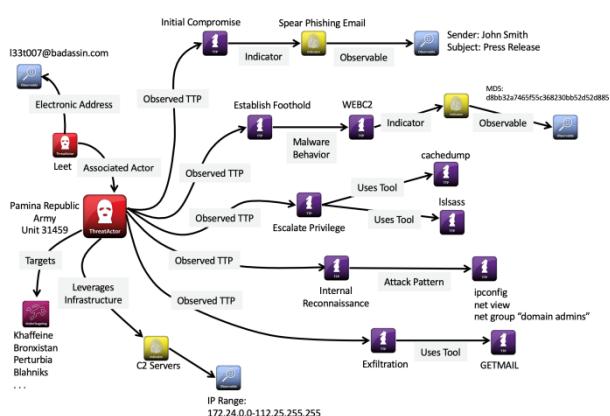


Рис. 2. Иерархия связей между различными типами IoT

III. МЕТОДИКА КЛАССИФИКАЦИИ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ О КИБЕРУГРОЗАХ ПО ОТРАСЛЯМ

На сегодняшний день в ИБ сложились два основных подхода к применению СТИ:

- Использование платных источников. Чаще всего это происходит в рамках применения популярных коммерческих ТПР, хотя возможна платная подписка отдельно на обогащённый источник.
 - Использование open source источников. Открытые источники не гарантируют своевременности, уникальности или качества индикаторов.

Иногда два варианта источника существуют параллельно в обоих вариантах, платном обогащённом и открытом минимально информативном.

Стоимость подключения к платному источнику как к сервису может достигать на российском рынке 25 000 долларов США в год, а стоимость подписки на TIP достигает нескольких миллионов долларов в год. Зачастую производители предлагают только комплексное решение в рамках IRP-платформы (Incident Response Platforms) – платформы, предназначеннной для автоматизации процессов мониторинга, учета и реагирования на инциденты информационной безопасности. Такая модель распространения ещё больше увеличивает цену решения. Естественно, для малого и среднего бизнеса, государственных организаций или просто организаций с низким уровнем зрелости процессов ИБ такие условия неприемлемы.

Поэтому имеется отчётливая тенденция использования открытых источников данных CTI или open source TIP, таких как MISP [14] или Yeti [15].

При этом у открытых источников имеется ряд проблем, которые обусловлены изначальным отсутствием системы поддержки:

- Дублирование IoC.
 - Невысокое качество IoC.
 - Объём выгружаемых IoC.
 - Релевантность по времени

Таким образом, решая проблему высокой цены использования платных источников, потребители сталкиваются с проблемой интеграции слабо структурированных данных открытых источников невысокого качества, либо со сложным выбором именно тех источников, которые релевантны защищаемой отрасли.

Авторами статьи был проведён ряд экспериментов, в результате которых была предложена практическая методика анализа и классификации открытых источников данных о киберугрозах по отраслям промышленности.

В ходе исследования анализировались индикаторы и отчёты об инцидентах, зарегистрированных в лидирующих на рынке TIP:

- Group IB.
 - R-Vision.
 - Anomali.
 - ESET-TI.
 - Kaspersky CyberTrace.

Предварительно был сформирован перечень из 70 отраслей промышленности на основе упоминаемых в отчётах популярных коммерческих TIP. Для этого анализировались *observables* для зарегистрированных инцидентов. Для удобства представления отрасли были объединены в 13 семейств:

1. Транспорт.
2. Здравоохранение.
3. Производство.
4. Розничная торговля.
5. Аэрокосмическая промышленность и оборона.
6. Строительство и Инжиниринг.
7. Образование и культура.
8. Энергия.
9. Развлечения и СМИ.
10. Финансовые услуги и страхование.
11. Высокие технологии и информационные технологии.
12. Международные организации и некоммерческие организации.
13. Правительство.

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 3.

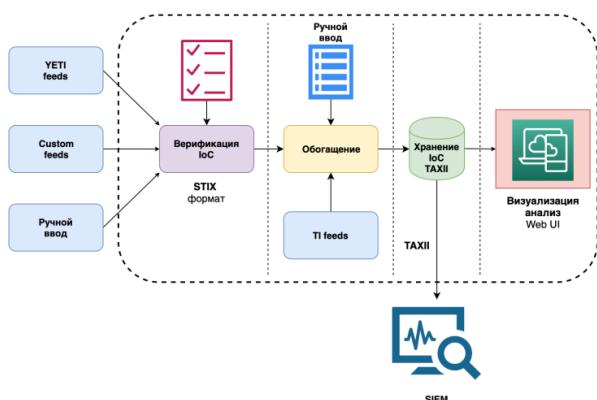


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

Методика состоит из следующих основных шагов:

1. Формирование либо актуализация списка источников для анализа.
2. Подключение выбранных источников к тестовой TIP (в экспериментальных исследованиях использовалась TIP Yeti [15]).
3. Загрузка максимально возможного числа индикаторов из всех доступных источников.
4. Поиск в коммерческих TIP инцидентов с обогащёнными индикаторами с проставленными тегами отраслей.
5. Поиск индикаторов в датасете АРТ-кампаний АРТ & Cybercriminals Campaign Collection [16] с учётом целевых отраслей атак.

6. Обратный поиск индикаторов с проставленными отраслями среди индикаторов из открытых источников.
7. Качественный и количественный анализ совпадений.

Для шага 6 была разработан специальная утилита. Данная методика позволила также выявить для каждого семейства наиболее специфичные киберугрозы, типы индикаторов компрометации и специфику источников информации СТИ. Ниже представлен пример результата для семейства «Финансовые услуги и страхование».

Специфичные киберугрозы:

- Утечка данных кредитных карт.
- Утечка банковских счетов.
- Банковские данные для продажи на черном рынке.
- Утечка другой частной информации.
- Поддельные аккаунты в социальных сетях.
- Фишинговые сайты (ориентация на сотрудников и/или клиентов).
- Список уязвимых целей.
- Угрозы VIP (менеджмент, клиенты).
- Инсайдерские угрозы.
- Мошеннический Cash Back или схема возврата налогов.

Специфичные IoC и источники:

- Утечки ip устройств и сервисов.
- Атакующие ip.
- url фишинга.
- Учётные записи клиентов.
- Упоминание брендов.
- Данные банковских карт.
- Клиентские ip, телефоны.
- Фрод.

Источники специфичны для финансовых и банковских организаций.

Примеры malware и crimeware:

- WITCHCOVEN
- Zeus

Полные результаты доступны по запросу у авторов.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ МЕТОДИКИ КЛАССИФИКАЦИИ

Результаты экспериментального исследования показали, что только ~20% исследованных открытых источников данных о киберугрозах можно классифицировать по отраслям (12 из 61).

- BenkowTracker.
- BenkowTrackerRat.
- ViriBackTracker.
- CybercrimeAtmTracker.
- HybridAnalysis.
- MalwareDomainsDotCom.

- Obtemoslab.
- RstThreatFreeDomainFeed.
- RstThreatFreeIpFeed.
- TorExitNodes'.
- ProcessHostnames.
- ProcessUrl.

Полные результаты с конкретными отраслями источников, включая ссылки и условия использования источников, также доступны по запросу у авторов.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены и классифицированы по отраслям публично доступные источники данных СТИ. Можно выделить следующие основные результаты:

- На основе анализа представленных на рынке ТИР разработан актуальный набор индустрий и семейств индустрий, являющихся целями кибератак.
- Выявлены киберугрозы, специфичные для конкретных семейств индустрий.
- Разработаны перечни индикаторов компрометации, специфичные для конкретных семейств индустрий, приведены примеры malware и crimeware.
- Проанализировано более 60 публично доступных источников данных СТИ, используемых пятью популярными ТИР. Разработана практическая методика классификации источников по индустриям.
- Получена результирующая классификация, которая может быть использована в практических целях при решении задач анализа киберугроз.
- Только ~20% исследованных открытых источников можно классифицировать по отраслям (12 из 61). Полученный результат показывает, что эту проблему необходимо решать на уровне сообществ по обмену индикаторами, наряду с проблемой соответствия общему формату распространения данных СТИ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-79-00194, <https://rscf.ru/project/21-79-00194/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Wiem Tounsi, Helmi Rais.* A survey on technical threat intelligence in the age of sophisticated cyber attacks // Computers & Security. – 2018. – Vol. 72. – P. 212-233. – ISSN 0167-4048. – <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.09.001>.
2. *Wiem Tounsi.* What is Cyber Threat Intelligence and How is it Evolving? Cyber-Vigilance and Digital Trust, Chapter: 1 Publisher: Wiley-ISTE. – P. 1-49. – DOI: 10.1002/9781119618393.ch1. – https://www.researchgate.net/publication/332648156_What_is_Cyber_Threat_Intelligence_and_How_is_it_Evolving.
3. Threat sharing methods: comparative analysis. Available at: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bd41a4c2&appId=PPGMS> (accessed 14 September 2021).
4. *Clemens Sauerwein, Irdin Pekaric, Michael Felderer, Ruth Breu.* An Analysis and Classification of Public Information Security Data Sources used in Research and Practice, December 2018, Computers & Security 82. – DOI: 10.1016/j.cose.2018.12.011. – https://www.researchgate.net/publication/329909717_An_Analysis_and_Classification_of_Public_Information_Security_Data_Sources_used_in_Research_and_Practice.
5. *Rafal Leszczyna, Michał R. Wróbel.* Threat intelligence platform for the energy sector // Software: Practice and Experience. – August 2019. – Vol. 49, Issue 8. – P. 1225-1254. – <https://doi.org/10.1002/spe.2705>.
6. The ROI of Threat Intelligence.
7. *Schlette, D., Böhm, F., Caselli, M. et al.* Measuring and visualizing cyber threat intelligence quality // Int. J. Inf. Secur. – 2021. – Vol. 20. – P. 21-38. – <https://doi.org/10.1007/s10207-020-00490-y>.
8. Threat Intelligence Reports by Industry. Available at: <https://www.fireeye.com/current-threats/reports-by-industry.html> (accessed 14 September 2021).
9. *Rui Azevedo, Ibéria Medeiros, Alysson N Bessani.* Automated Solution for Enrichment and Quality IoC Creation from OSINT, September 2018, Conference: Simpósio de Informática (INFORUM 2018), At: Coimbra, Portugal. – https://www.researchgate.net/publication/327835294_Automated_Solution_for_Enrichment_and_Quality_IoC_Creation_from_OSINT.
10. *Mokaddem S., Wagener G., Dulaunoy A. and Andras Iklody.* Taxonomy driven indicator scoring in MISP threat intelligence platforms. ArXiv abs/1902.03914 (2019): n. pag. – <https://arxiv.org/pdf/1902.03914.pdf>.
11. *Mario Faiella, Gustavo Gonzalez-Granadillo, Iberia Medeiros, Rui Azevedo, Susana Gonzalez-Zarzosa.* Enriching Threat Intelligence Platforms Capabilities, July 2019. – DOI: 10.5220/0007830400370048, Conference: 16th International Conference on Security and Cryptography (SECRYPT), At: Prague, Czech Republic, https://www.researchgate.net/publication/333079754_Enriching_Threat_Intelligence_Platforms_Capabilities.
12. *Fachkha Claude.* Darknet as a Source of Cyber Threat Intelligence: Investigating Distributed and Reflection Denial of Service Attacks // A Thesis in The Department of Electrical and Computer Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2015. – 239 p.
13. Туманов Д.А., Абрамов Е.С. Обзор платформ для анализа киберугроз // Материалы VIII Всероссийской молодежной школы-семинара по проблемам информационной безопасности «Перспектива – 2019». Изд-во «Лукоморье», 2019. –300 с.
14. *Wagner C., Dulaunoy A., Wagener G. and Iklody A.* MISP: The Design and Implementation of a Collaborative Threat Intelligence Sharing Platform // In Proceedings of the 2016 ACM on Workshop on Information Sharing and Collaborative Security (WISCS'16). – 2016. – P. 49-56. – DOI: 10.1145/2994539.2994542.
15. Yeti - Your everyday threat intelligence. Available at: <https://yeti-platform.readthedocs.io/en/latest/> (accessed 14 September 2021).
16. APT & Cybercriminals Campaign Collection. Available at: https://github.com/CyberMonitor/APT_CyberCriminal_Campaign_Collections. accessed 14 September 2021).

Оценка инфраструктурных рисков деструктивного характера на субъекте критической информационной инфраструктуры

Максимова Елена Александровна
Институт комплексной безопасности
и специального приборостроения
Российский технологический
университет (РТУ) МИРЭА
Москва, Россия
maksimova@mirea.ru

Баранов Владимир Витальевич
Департамент по специальному
образованию и делам казачества
Южно-Российский государственный
политехнический университет
Новочеркасск, Россия
baranov.vv.2015@yandex.ru

Садовникова Наталья Петровна
Кафедра "Системы
автоматизированного
проектирования и поискового
конструирования",
Волгоградский государственный
технический университет
Волгоград, Россия
npsn1@yandex.ru

Аннотация. С введением 187-ФЗ проблема оценки рисков информационной безопасности (ИБ) субъектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) приобретает новый контекст, в том числе из-за возникающего на уровне субъекта КИИ эффекта инфраструктурного деструктивизма. Предложенный подход позволяет оценить риски ИБ субъекта КИИ в динамике и выйти на прогнозную модель, учитывающую модельные изменения инфраструктуры субъекта, способные привести к саморазрушению системы, оценить синергетический эффект субъекта КИИ как системы и определить бифуркационные значения параметров системы, работа с которыми позволит повысить эффективность системы защиты информации на уровне субъекта КИИ.¹

Annotation. With the introduction of 187-FL, the problem of assessing the risks of information security (IS) of subjects of critical information infrastructure (CII) acquires a new context, including due to the effect of infrastructural destructivism that occurs at the level of the subject of CII. The proposed approach allows us to assess the risks of the information security of the subject of the CII in dynamics and to reach a predictive model that takes into account model changes in the infrastructure of the subject that can lead to the self-destruction of the system, to assess the synergetic effect of the subject of the CII as a system and to determine the bifurcation values of the system parameters, working with which will increase the effectiveness of the information protection system at the level of the subject of the CII.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, субъект, инфраструктурный риск, оценка рисков, деструктивизм, динамика, когнитивная модель, межобъектные связи.

Keywords: critical information infrastructure, subject, infrastructure risk, risk assessment, destructivism, dynamics, cognitive model, inter-object relations.

I. ВВЕДЕНИЕ

Оценка рисков – один из ключевых вопросов в сфере ИБ, позволяющий практически на всех этапах жизненного цикла информационной, телекоммуникационной, автоматизированной и др. видов систем отреагировать на изменения в системе, в том числе происходящие как при злоумышленных воздействиях, так и под воздействием изменения инфраструктуры.

Само понятие «риск» имеет неоднозначное толкование. Например, риск рассматривается как «угроза утраты предприятием части своих ресурсов, появления непредвиденных расходов или недополучения доходов вследствие осуществления производственной и финансовой деятельности» [1], как «уровень неопределенности потенциальной возможности получения доходов предприятием» [2].

В сфере ИБ риски рассматриваются как «мера информационной опасности, которая характеризует вероятность возникновения опасности и размеры ущерба для репутации предприятия» [3], как «возможность возникновения ущерба в виде убытков в результате применения предприятием информационных технологий» [4], как «вероятность нанесения ущерба предприятию, связанного с нарушением целостности информационной системы» [5], как «вероятность того, что некоторая информационная угроза сможет воспользоваться уязвимостью группы активов или отдельно взятого актива предприятия, тем самым нанеся ему значительный ущерб» [6].

Согласно [7] риск информационной безопасности – «возможность того, что данная угроза сможет воспользоваться уязвимостью актива или группы активов и тем самым нанесет ущерб организации» или «риск – сочетание вероятности события и его последствий» согласно [8].

Исследованию вопросов оценки рисков ИБ, к примеру, посвящены работы [9–13] и др.

В работе [14] представлены стандартные процедуры менеджмента рисков ИБ на предприятии. Дается представление о методологии и нормативном обеспечении

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ, проект № 3/2020).

процедур управления риском. Рассмотрены инструментальные средства, применяемые на практике при оценке безопасности предприятия.

II. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Менеджмент риска ИБ является значимым направлением в менеджменте ИБ и основывается на установлении контекста, оценки риска, обработки риска, принятия риска, коммуникации риска, мониторинга и переоценки риска [7].

Согласно [7] он измеряется, исходя из комбинации вероятности события и его последствия, то есть согласно двухфакторной модели оценки рисков.

Двухфакторная модель оценки рисков ИБ – наиболее распространенный подход, описанный в стандартах [15 - 18] и рекомендуемый регуляторами в том числе в [19].

В это же время некоторые компании самостоятельно разрабатывают методики оценки рисков, отличающиеся используемыми инструментальными средствами [20]. Например, согласно методики Microsoft выполняется идентификация угроз ИБ в информационной и вычислительной среде предприятия. Оценка рисков при этом выполняется в 2 этапа: идентифицируется профиль риска и оценивается индекс эшелонированной защиты.

В ходе анализа рисков с помощью методики RiskWatch можно выполнить выбор мер и средств защиты.

В основе метода CRAMM лежит комплексный подход к оценке рисков, сочетающий количественные и качественные методы анализа.

В методике ГРИФ на предварительном этапе выполняется построение модели информационной системы. Данный этап является существенным для решения основной оценочной задачи.

С помощью программных продуктов Cobra и КОНДОР+ выполняется проверка политики безопасности на соответствие Международному стандарту управления информационной безопасностью ISO 17799.

III. ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ "ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ РИСКИ"

Понятие «инфраструктурные риски» в настоящее время относится к транспортной сфере [21], рассматривается с точки зрения инфраструктурных отраслей в рыночной экономике [22], в макроэкономическом анализе [23], при решении вопросов инвестирования [24] и др.

В сфере ИБ категория «инфраструктурные риски» как самостоятельная категория не используется. При этом, с введением 187-ФЗ [25] проблема оценки рисков ИБ субъектов КИИ приобретает новый контекст, исходя из специфики обозначенного в данном ФЗ объекта защиты, в том числе из-за возникающего на уровне субъекта КИИ эффекта инфраструктурного деструктивизма.

В данном исследовании, под инфраструктурными рисками субъекта КИИ деструктивного характера (далее – инфраструктурных рисков) будем понимать возможность того, что факторы влияния на ИБ субъекта КИИ смогут повлиять на реализуемые критические процессы с последующим саморазрушением инфраструктуры субъекта КИИ.

Существенной особенностью инфраструктурных рисков является наличие специфических свойств, присущих:

1) субъекту КИИ как системе;

2) деструктивным воздействиям на субъекте КИИ инфраструктурного характера.

Так, для субъекта КИИ это: инфраструктурная гибкость, сложность организации, динамичность инфраструктуры. Для деструктов - накопительный характер воздействия во времени.

Важно отметить, что в качестве деструктов в ходе исследования определены:

Destr 0 – ошибки, связанные с первичной разработкой информационной инфраструктуры организации (предприятия);

Destr 1 – ошибки при анализе требований для субъекта КИИ;

Destr 2 – ошибки инфраструктурного анализа;

Destr 3 – ошибки в проектировании системы защиты;

Destr 4 – ошибки при реализации системы защиты субъекта КИИ;

Destr 5 – ошибки при внедрении системы защиты субъекта КИИ;

Destr 6 – ошибки при сопровождении субъекта КИИ;

Destr 7 – инфраструктурное возмущение системы (добавление/удаление объекта КИИ);

Destr 8 – не учет межобъектных связей в среде субъекта КИИ;

Destr 9 – не учет межсубъектных отношений в среде функционирования КИИ.

IV. ЭЛЕМЕНТЫ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СУБЪЕКТА КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Модель оценки ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях – основа оценки рисков инфраструктурного характера на субъекте КИИ. Ее построение выполнялось на основании методологии когнитивного моделирования. На рис. 1 представлена когнитивная карта данной модели.

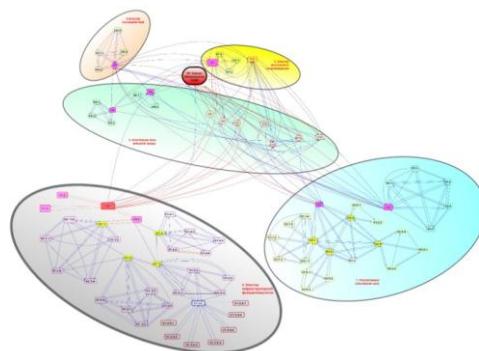


Рис. 1. Когнитивная карта модели оценки ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях

Данная модель имеет кластерное распределение концептов, где:

1 зона: регулятивная кластерная зона (зона концептов оценки категории значимости объектов КИИ);

2 зона: кластер инфраструктурной функциональности;

3 зона: кластер внутреннего сопровождения;

4 зона: кластерная зона внешней среды;

5 зона: кластер последействия.

Для оценки силы деструктивных воздействий инфраструктурного характера на субъекте КИИ в кластерной когнитивной модели наибольший интерес представляет зона 2 – кластер инфраструктурной функциональности. Здесь под инфраструктурной функциональностью субъекта КИИ рассматривается интегративная оценка сохранения функциональности, целостности, устойчивости инфраструктуры под влиянием воздействий. В данную кластерную зону включены концепты, связанные с факторами рисков информационной безопасности субъекта КИИ на уровне инфраструктуры субъекта КИИ.

В качестве воздействий рассматривались:

1) воздействия типа 1 – внутренние воздействия, т.е. воздействия со стороны самой инфраструктуры (результат влияния на уровне межобъектных связей на систему);

2) воздействия типа 2 – внешние воздействия, т.е.

2.1. Воздействия со стороны внешней среды (не управляемые),

2.2. Злоумышленные воздействия (не управляемые),

2.3. Воздействия на уровне межсубъектных связей (управляемые).

В рамках данного исследования нас интересует оценка функциональности субъекта КИИ при исследовании воздействий типа 1 и типа 2.3. Данные факторы влияния носят накопительный характер и приводят к нарушению доступности информации и деструктивным последствиям для субъекта КИИ.

Нечеткая когнитивная карта, описывающая влияние концептов на оценку функциональности субъекта КИИ, строилась по результатам экспертного опроса при участии сотрудников ООО «Региональный аттестационный центр». Целью опроса являлся сбор информации о факторах и условиях, которые, по мнению опрашиваемых, наиболее сильно влияют на оценку функциональности субъекта КИИ. По результатам экспертного опроса выделен список концептов, определяющих факторы рисков безопасности субъектов КИИ, связанных с функциональностью субъекта КИИ:

V1: Факторы рисков ИБ субъекта КИИ, связанные с функциональностью субъекта КИИ,

V1:1 – Оценка инфраструктурного деструктивизма субъекта КИИ,

V1*:1 – Ошибки, связанные с развитием системы защиты информации субъекта КИИ на разных этапах жизненного цикла,

V1:1 -1 – Ошибки, связанные с первичной разработкой информационной инфраструктуры организации (предприятия) (Destr 0),

V1: 1-2 – Ошибки в проектировании системы защиты на объектах субъекта КИИ (Destr 3),

V1:1-3 – Ошибки при реализации системы защиты субъекта КИИ (Destr 4),

V1:1-4 – Ошибки при внедрении системы защиты на объектах СКИИ (Destr 5),

V1:1-5 – Отсутствие (не корректное построение) системы разграничения доступа в среде субъекта КИИ,

V1*:2 – Оценка факторов риска безопасности субъекта КИИ инфраструктурного характера:

V1:2-1 – Ошибки, связанные с описанием архитектуры субъекта КИИ,

V1: 2-2 – Ошибки, связанные с определением перечня объектов, подлежащих категорированию,

V1: 2-3 – Ошибки при анализе требований для субъекта КИИ (Destr 1),

V1:2-4 – Ошибки при сопровождении субъекта КИИ (Destr 6),

V1:2-5 – Ошибки при категорировании объектов КИИ,

V1*:3 – Оценка факторов риска безопасности субъекта КИИ, связанных с межобъектными связями:

V1:3-1 – Ошибки инфраструктурного анализа (Destr 2),

V1:3-2 – Не учет межобъектных связей в среде субъекта КИИ (Destr 8),

V1:3-3 – Снижение уровня безопасности межобъектного взаимодействия,

V1:3-4 – Инфраструктурное возмущение системы (добавление/удаление объекта КИИ) (Destr 7),

V1:3-5 – Наличие деструктивно-образующих межобъектных связей,

V1:3-5-1 – Наличие инфраструктурной связи типа «Облигативный симбиоз»,

V1:3-5-2 – Наличие инфраструктурной связи типа «Факультативный симбиоз»,

V1:3-5-3 – Наличие инфраструктурной связи типа «Комменсаллизм»,

V1:3-5-4 – Наличие инфраструктурной связи типа «Нейтрализм»,

V1:3-5-5 – Наличие инфраструктурной связи типа «Аменсаллизм»,

V1:3-5-6 – Наличие инфраструктурной связи типа «Аллелопатия»,

V1:3-5-7 – Наличие инфраструктурной связи типа «Конкуренция»,

V1*:4: Оценка факторов риска безопасности СКИИ, связанных с межсубъектными связями:

V1:4-1 – Не учет межсубъектных отношений в среде функционирования КИИ (Destr 9),

V1:4-2 – Снижение уровня безопасности взаимодействующих субъектов КИИ.

V1:4-3 – Снижение уровня безопасности межсубъектного взаимодействия,

V1:4-4 – Наличие прямых межсубъектных связей,

V1:4-5 – Наличие косвенных межсубъектных связей,

V1:2 – Оценка инфраструктурной устойчивости,

V1:3 – Оценка инфраструктурной целостности.

В результате исследования определена значимость оценки инфраструктурной функциональности субъекта КИИ на интегративную оценку безопасности субъекта КИИ. Это послужило основанием для формирования соответствующего кластера инфраструктурной функциональности в модели «Оценка ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях». Функциональная нагрузка данного кластера определена многокомпонентной оценкой функциональности СКИИ:

$$m_V1 = f(m_V1:1, m_V1:2, m_V1:3),$$

где m_V1 – мера функциональной нагрузки кластера инфраструктурной функциональности субъекта КИИ,

$m_V1:1$ – мера оценки инфраструктурного деструктивизма субъекта КИИ (значение концепта V1:1),

$m_V1:2$ – мера оценки инфраструктурной устойчивости (значение концепта V1:2),

$m_V1:3$ – мера оценки инфраструктурной целостности (значение концепта V1:3).

На основании вышеизложенного, таким образом, можно говорить о функциональности субъекта КИИ как свойстве КИИ, характеризующем, в том числе целостность как на уровне информации, так и на уровне инфраструктуры.

V. Дискуссия

Исходя из вышеизложенного, можно говорить об инфраструктурных рисках, как о динамических рисках, т.е. изменяющихся во времени. При этом, риск ИБ субъекта КИИ ($Risk$) есть аддитивная оценка, основанная на оценке рисков стандартных факторов влияния ($Risk1$) и инфраструктурных рисков ($Risk2$):

$$Risk = Risk1 + Risk2. \quad (1)$$

$Risk1$ при этом определяется факторами, влияющими на оценку ИБ субъекта КИИ, представленными в общей когнитивной модели. В данном случае, для оценки ИБ субъекта КИИ в качестве базового используется метод когнитивного моделирования и сценарный подход.

$Risk2$ определяется концептами второго слоя модели, влияющими на оценку ИБ субъекта КИИ, представленными в общей когнитивной модели.

Важно отметить, что деструктивное воздействие на субъект КИИ в данном исследовании рассматривается

только на инфраструктурном уровне. Следовательно, "на входе" примем наличие эффекта накопительного характера только у факторов, приводящих к саморазрушению системы, определяющих инфраструктурный риск: $Risk2$. Однако, не все виды межобъектных и межсубъектных связей, и ни при любых условиях являются источниками инфраструктурного деструктивизма. Таким образом, при оценке $Risk2$ из набора факторов, при дополнительных исследованиях субъекта КИИ, учитываются только деструктивно-образующие факторы.

Используя двухфакторный подход к оценке рисков ИБ формулу (1) представим в виде:

$$Risk = Risk1 + Risk2 = \sum_{i=1}^k C_i \cdot p_i + \sum_{j=1}^l C_j \cdot p_j \cdot \lambda_j(t),$$

где C_m – стоимость возможного ущерба от реализации m -го фактора;

p_m – вероятность реализации m -го фактора;

$\lambda_j(t)$ – интенсивность накопления деструктивного воздействия j -го фактора на субъект КИИ во времени.

Следовательно,

$$Risk = f(t).$$

При этом $Risk \neq f(t)$, если на субъекте КИИ будут отсутствовать деструктивно-образующие связи. В данном случае:

$$Risk = \sum_{i=1}^n C_i \cdot p_i.$$

Кроме того, для анализа риска ИБ можно воспользоваться относительной оценкой:

$$Risk^*(t) = \frac{Risk2(t)}{Risk(t)} \cdot 100\%.$$

Для анализа риска ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях необходимо ввести шкалу оценки рисков. Для этого необходимо, в первую очередь, определить минимальное и максимально возможные значения риска:

$$Risk_{max} = \sum_{i=1}^k C_i + \max_{j,t} \lambda_j(t) \cdot \sum_{j=1}^l C_j,$$

$$Risk_{min} = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Тогда величина промежутка значений риска:

$$|Risk| = Risk_{max} - Risk_{min} = \max_{j,t} \lambda_j(t) \cdot \sum_{j=1}^l C_j - \sum_{i=k+1}^n C_i.$$

$\lambda_j(t)$ – случайная функция риска, в том числе с возможной неравномерностью, что влияет и на распределение риска ИБ в целом. При этом, к примеру, при нормально распределенной функции риска, можно определить промежуток времени, для которого риск будет критическим (рис. 2).

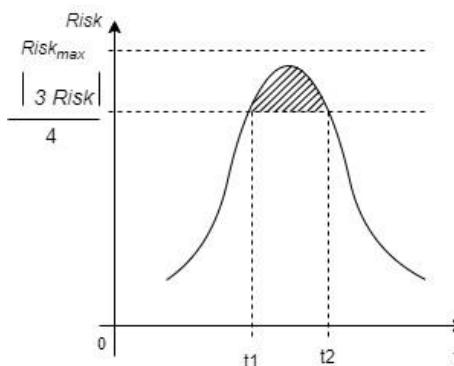


Рис. 2. Определение промежутка времени, для которого риск будет критическим при нормально распределенной функции риска ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях

В итоге, четырехуровневая шкала оценки рисков ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях примет вид:

$$Ric. 3. Risk \equiv \begin{cases} \text{низкий, если } Risk_{min} \leq Risk < \frac{|Risk|}{4}; \\ \text{средний, если } \frac{|Risk|}{4} \leq Risk < \frac{|Risk|}{2}; \\ \text{высокий, если } \frac{|Risk|}{2} \leq Risk < \frac{3|Risk|}{4}; \\ \text{критичный, если } \frac{3|Risk|}{4} \leq Risk \leq Risk_{max}. \end{cases}$$

Таким образом, для оценки риска ИБ субъекта КИИ при деструктивных воздействиях, необходимо знать вид функции $\lambda_j(t)$. Решить данный вопрос на сегодняшний момент не возможно, так как отсутствует статистика, позволяющая определить вид эмпирической функции.

VI. Выводы

Предложенный подход позволяет оценить риски ИБ субъекта КИИ в динамике и выйти на прогнозную модель, учитывающую модельные изменения инфраструктуры субъекта, способные привести к саморазрушению системы, оценить синергетический эффект субъекта КИИ как системы и определить бифуркационные значения, параметров системы, работа с которыми позволит повысить эффективность системы защиты информации на уровне субъекта КИИ [26–30].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безверхая Е.Н., Губа И.И., Ковалева К.А. Информационная безопасность предприятия: сущность и факторы. – Краснодар: Традиция, 2015. – 157 с.
2. Бадалова А.Г., Пантелейев А.В. Управление рисками деятельности предприятия. – М.: Вузовская книга, 2015. – 236 с.
3. Тепман Л.Н., Эриашвили Н.Д. Управление информационными рисками: учебное пособие. – М.: ЮНИТИ, 2016. – 215 с.
4. Шаныгин В.Ф. Информационная безопасность и защита информации. – М.: ДМК, 2014. – 702 с.
5. Милославская Н.Г., Сенаторов М.Ю., Толстой А.И. Управление рисками информационной безопасности: учебное пособие для вузов. – М.: РИС, 2014. – 130 с.
6. Замула А.А. Методы оценивания и управления информационными рисками // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – № 3. – С. 182-18..
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности от 30 ноября 2010. – 41 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084141> (дата обращения: 21.06.2021).
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000-2012 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Общий обзор и терминология от 15 ноября 2012 41. – URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения: 20.06.2021).
9. Царегородцев А.В., Макаренко Е.В. Методика количественной оценки риска в информационной безопасности облачной инфраструктуры организации // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2014. – № 44 (281). – С. 30-41 – URL: <https://metodika-kolichestvennoy-otsenki-riska-v-informatsionnoy-bezopasnosti-oblachnoy-infrastruktury-organizatsii.pdf> (дата обращения: 22.05.2021).
10. Плетнёв П.В. Алгоритмы и методики оценки угроз информационной безопасности в сетях и системах телекоммуникаций: автореферат, дисс. ... канд. техн. наук по специальности 05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки). – Новосибирск, 2017. – 18 с.
11. Милославская Н.Г., Толстой А.И.; Милославская Н.Г. Управление рисками информационной безопасности: учебное пособие.. – М. : Горячая линия – Телеком, 2013 . – 131 с. – (Вопросы управления информационной безопасностью). – ISBN 978-5-9912-0272-5. – URL: <https://rucont.ru/efd/202844> (дата обращения: 17.08.2021).
12. Ажмухamedov И.М. Управление слабоформализуемыми социотехническими системами на основе нечеткого когнитивного моделирования (на примере систем комплексного обеспечения информационной безопасности): автореферат, дисс. ... д-ра техн. наук по специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность, информатика), 05.13.19 Методы и системы защиты информации, информационная безопасность. – Астрахань, 2014. – 32 с.
13. Ажмухamedов И.М., Выборнова О.Н., Брумштейн Ю.М. Управление рисками информационной безопасности в условиях неопределенности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2016. – Т. 1. – С. 7-14.
14. Веселов Г.Е., Абрамов Е.С., Шилов А.К. Менеджмент риска информационной безопасности: учебное пособие. – Таганрог: ЮФУ, 2016. – 107 с. – ISBN 978-5-9275-2327-5. – Текст: электронный.
15. ГОСТ Р 51901.23-2012 Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по оценке риска опасных событий для включения в реестр риска (Переиздание) от 29 ноября 2012 - docs.cntd.ru (дата обращения: 20.06.2021).
16. Р 50.1.068-2009 Менеджмент риска. Рекомендации по внедрению. Ч. 1. Определение области применения от 15 декабря 200941. – URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения: 20.06.2021).
17. Р 50.1.090-2014 Менеджмент риска. Ключевые индикаторы риска от 08 октября 2014 41. – URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения: 20.06.2021).
18. Р 50.1.084-2012 Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по созданию реестра риска организации от 29 ноября 2012 41. – URL: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения: 20.06.2021).
19. Методический документ "Методика оценки угроз безопасности информации" (утв. Федеральной службой по техническому и экспортному контролю 5 февраля 2021 г.) 41. – URL: <https://garant.ru> (дата обращения: 20.06.2021).
20. Баранова Е.К. Методики анализа и оценки рисков информационной безопасности // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте. – 2015. – № 1. – С. 73-79.
21. Инфраструктурные риски Распоряжение Правительства РФ от 03.04.2013 N 512-р <Об утверждении государственной программы Энергоэффективность и развитие энергетики> -41. – URL: <https://sudact.ru> (дата обращения: 15.06.2021).
22. Хечиев Е.В. Типология инфраструктурных ограничений развития бизнеса // Научные ведомости. – 2009. – № 1 (56). – С. 228-23541. – URL: https://Hechiev_Tipologiya.pdf (дата обращения: 15.07.2021).
23. Риски слияний и поглощений: Слияние и поглощение: Другие материалы:: Macro-Econom.ru.
24. Ланцов А.Е. Инфраструктурные проекты: ошибки прогнозирования, неопределенности и риски // Статистика и Экономика. – 2014. – (2). – Р. 99-104. 41. – URL: <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2014-2-99-104> (дата обращения: 30.06.2021).

25. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 N 187-ФЗ.
– URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/ (дата обращения: 30.03.2021).
26. Максимова Е.А. Оценка информационной безопасности субъекта критической информационной инфраструктуры при деструктивных воздействиях: монография: Федер. гос. авт. образоват. учреждение высш. образования «Волгогр. гос. ун-т». – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2020. – 95 с.
27. Баранов В.В., Максимова Е.А., Лаута О.С. Анализ модели информационного обеспечения процессов и систем при реализации многоагентного интеллектуального взаимодействия // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 4. – С. 32-41.
28. Баранов В.В., Максимова Е.А., Московченко В.М., Лаута О.С Робототехническая система анализа кибербезопасности информационных систем и сетей связи // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. сборник трудов Международной научной конференции. – 2019. – С. 1501-1507.17.
29. Максимова Е.А. Исследование алгоритмов безопасной передачи данных между объектами критической информационной инфраструктуры // Сборник докладов XXIII пленума ФУМО ВО ИБ и Всероссийской научной конференции "Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации" (Инфобезопасность - 2019): Доклады XXIII пленума ФУМО ВО ИБ и Всероссийской научной конференции / отв. редактор: В.И. Петренко. – 2019. – С. 157-163.
30. Максимова Е.А., Баранов В.В., Зязин В.П. Модель оценки рисков при расследовании компьютерных преступлений // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2018. – № 4 (30). – С. 38-42.

База знаний об атаках на беспилотные летательные аппараты

Басан Елена Сергеевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ebasan@sedu.ru

Басан Александр Сергеевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ebasan@sedu.ru

Некрасов Алексей Валентинович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
nekrasovav@sedu.ru

Пескова Ольга Юрьевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
oypeskova@sedu.ru

Шулика Мария Геннадьевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
mshulika@sedu.ru

Аннотация. В этой статье исследуются риски и угрозы информационной безопасности, кибербезопасности, которые возникают в результате быстрого роста популярности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), уделяется особое внимание существующим и будущим уязвимостям. Предлагаются концептуальные подходы, предназначенные для обнаружения и категоризации киберугроз, связанных с БПЛА, включая использование БПЛА, как целей и векторов кибератаки, а также возможности их использования, как союзниками, так и противниками. Эти подходы были применены к реальным сценариям угроз, чтобы проверить их достоверность и проиллюстрировать типы атак, которые в настоящее время возможны. Также представлены отраслевые тенденции и последствия этих тенденций для кибербезопасности.

Annotation. This article examines the risks and threats to information security, cybersecurity that arise because of the rapid growth in popularity of unmanned aerial vehicles (UAVs), paying special attention to existing and future vulnerabilities. Conceptual approaches are proposed for detecting and categorizing cyber threats associated with UAVs, including the use of UAVs as targets and vectors of a cyberattack, as well as the possibility of their use by both allies and adversaries. These approaches have been applied to real-world threat scenarios to validate and illustrate the types of attacks that are currently possible. It also presents industry trends and the implications of these trends for cybersecurity.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, угроза, уязвимость, онтология, концепт, структура.

Keywords: attack, unmanned aerial vehicle, threat, vulnerability, ontology, concept, structure.

I. ВВЕДЕНИЕ

В мире постоянных и быстрых технологических изменений минимизация уязвимостей – это бесконечный процесс против своих противников – их технологий, их устройств, их идей, их режимов работы, их тактики и использования ими технологических тенденций для достижения своих политических, военных целей. Одной из

таких современных технологий являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые могут вызвать негативные последствия для кибербезопасности: развитие и распространение гражданских и военных БПЛА сделало их более распространенными, более доступными и в тоже время технологически сложными, БПЛА обеспечивают выполнение новых функций, таких как расширенный сбор данных и автономное выполнение целей. Как следствие, БПЛА меняют мир кибербезопасности двумя ключевыми способами.

Во-первых, БПЛА представляют собой новый вид критически важной цели кибербезопасности. Важнейшие миссии правоохранительных органов или сбора данных с использованием БПЛА могут быть подорваны кибератаками на эти платформы.

Во-вторых, БПЛА в руках злоумышленников, террористов или противника могут предоставить новые возможности для кибератак, при этом БПЛА сами по себе служат «кибероружием», предназначенным для доставки вредоносного контента или кинетических воздействий. Таким образом, БПЛА необходимо рассматривать, как новый тип вооружения и учитывать это при их разработке и проектировании. Например, рои БПЛА, несущие большое количество взрывчатых веществ, могут атаковать критически важные объекты, такие как аэропорты, нефтеперерабатывающие заводы и т.п. За счет «каскадных эффектов» (когда группы БПЛА атакуют объекты последовательно) разрушать взаимозависимые системы, такие как критические элементы электросети.

На сегодняшний день многие страны мира, которые являются потенциальными противниками России, проводят исследования в области поиска и эксплуатации уязвимостей БПЛА. Иностранные государства тратят значительные ресурсы на исследования, посвященные анализу киберугроз и кибер атак. Одним из примеров таких исследований является научный доклад, который проводился с использованием внутреннего финансирования, полученного в результате деятельности Исследователь-

ского отдела внутренней безопасности RAND (HSRD) и в рамках Программы приобретения и развития HSRD. HSRD проводит исследования и анализ внутренней безопасности США и служит платформой, с помощью которой RAND передает актуальные исследования из всех своих подразделений Home-land Security Enterprise. В этой работе исследуются последствия быстрого роста технологий БПЛА с точки зрения информационной безопасности.

При этом особое внимание уделяется текущим уязвимостям и тенденциям, к появлению новых уязвимостей. По мере того, как дроны становятся все более распространенными и сложными, вероятность и потенциальные последствия угроз безопасности возрастают. По одной из оценок, к 2021 году продажи пилотируемых или автономных дронов превысят 12 миллиардов долларов [1].

Авторы доклада [2] предлагают концептуальные подходы, позволяющие обеспечить возможность обнаружения и категоризации киберугроз, связанных с БПЛА. При этом авторы разделяют подходы на два уровня, которые включают в себя анализ угроз самих БПЛА и анализ угроз, которые могут быть реализованы при использовании БПЛА. Подходы, основанные на анализе угроз, характерных для БПЛА, авторы характеризуют голубым цветом и связаны с оборонительной стратегией, в том числе с обнаружением уязвимостей в системе, связанной с БПЛА. В то время как подходы на основе анализа угроз, которые могут исходить от самого БПЛА, авторы ассоциируют с красным цветом и атакующей стратегией, при этом подходы основаны на анализе того, как успешно атаковать систему с использованием БПЛА. Эти подходы применяются к реальным сценариям реализации угроз, чтобы проверить их достоверность и проиллюстрировать типы атак, которые в настоящее время возможны. Примеры атак, а также структурированный обзор литературы, посвященной анализу и исследованию кибер-угроз, БПЛА, помогают понять картину вероятного пространства угроз сегодня и в ближайшем будущем.

Из доклада становится также очевидным, что в США ожидается, что дроны станут более интегрированными с функциями департамента обеспечения внутренней безопасности и правоохранительных органов. Новые разработки в области БПЛА, в том числе внедрение более сложного и автономного программного обеспечения для управления, а также возможность создавать сети дронов через мобильные сети, расширяют диапазон и сложность потенциальных атак. Контроллеры БПЛА и управляющие сигналы, передаваемые между БПЛА, между оператором и БПЛА, а также внутри самого БПЛА представляют собой уязвимости и точки входа для злоумышленников [3]. Также исследуются возможности использования методов агентного моделирования для описания угроз и помощи в определении требований и рекомендаций по защите от злоумышленника. Агентное моделирование является ключевым методом, который может позволить анализировать способы проведения атак с помощью дронов и предоставляет аналитикам, исследователям, способы для смягчения потенциальных атак и минимизации рисков, степени ущерба [4].

II. АНАЛИЗ КОНЦЕПТОВ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ БПЛА

Таким образом кибербезопасность БПЛА характеризуется факторами, которые могут ее нарушить, факторами, которые возникают в результате нарушения безопасности и факторами, которые могут препятствовать нарушению безопасности. Рассмотрим концепцию кибербезопасности, представленную на рис. 1.

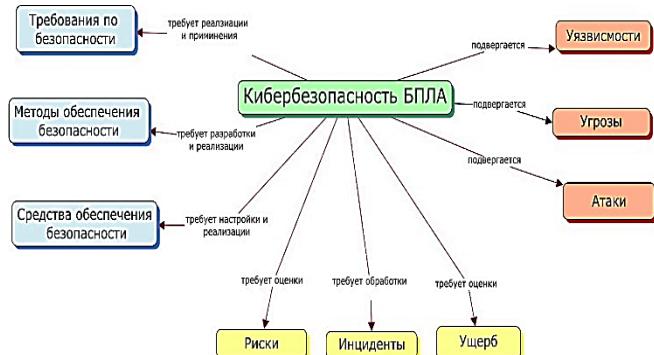


Рис. 1. Представление основных концептов кибербезопасности БПЛА

Каждый из концептов, представленных на рисунке, требует отдельного внимания и изучения, которое будет представлено далее. Для начала рассмотрим группы концептов. Первая группа концептов представлена справа и концепты выделены красным цветом, данные концепты ассоциируются с теми вызовами и опасностями, которым подвергается кибербезопасность БПЛА. В верхнем правом углу показаны уязвимости, уязвимость является причиной возникновения угрозы и дальнейшей реализации атаки на БПЛА. Своевременное выявление и ликвидация уязвимостей является серьезной задачей. В случае если уязвимость эксплуатируется злоумышленником это может привести к серьезному инциденту информационной безопасности и различному типу ущерба.

Как было сказано ранее БПЛА предоставляют новые возможности в области обеспечения охраны объектов и проведение разведывательных операций. Так на пример, подразделения департамента внутренней безопасности США используют и планируют продолжать использовать сочетание, как разработанных Министерством обороны США (Predator и ScanEagle), так и коммерчески разработанных БПЛА в своей деятельности. Департамент внутренней безопасности США использует БПЛА в четырех областях применения: Береговая охрана США (U.S. Coast Guard USCG), Служба таможенного и пограничного контроля (Customs and Border Protection CBP), Федеральное агентство по чрезвычайным ситуациям (Federal Emergency Management Agency FEMA) и Агентство по кибербезопасности и безопасности инфраструктуры (CISA). Однако, за исключением береговой охраны США, все подразделения планируют использовать в основном БПЛА доступные на рынке и производственные коммерческими компаниями.

Однако их введение влечет за собой и проблемы с точки зрения кибербезопасности. Использование коммерческих БПЛА влечет за собой риски связанные с возможностью эксплуатации уязвимостей и реализации новых типов атак, характерных исключительно для

БПЛА. Рассмотрим некоторые функции, которые могут быть реализованы для обеспечения внутренней безопасности с помощью БПЛА и риски, которые связаны с применением БПЛА для реализации данных функций:

- применение БПЛА для реализации функций сбора сведений, наблюдения и зондирования, для исключения слепых зон зоны при обнаружении контрабанды или других действий на границах и в портах. БПЛА могут также быть использованы для других видов деятельности; например, сканирование химических, биологических, радиологических, ядерных и взрывчатых веществ в портах. При этом если безопасность БПЛА нарушена, и они скомпрометированы это может нанести значительный финансовый ущерб, вызванный задержкой движение груза, пока система не будет исправлена, или даже БПЛА могут посыпать ложные «безопасные» показания опасного груза. Взломанный БПЛА также может создать неизвестный риск, если оператор не знает о нарушении.
- взломанный БПЛА может ограничить возможности по выявлению, доставке лиц, находящихся в опасности или имеющим проблему со здоровьем, в зонах бедствия. Это может произойти как из-за того, что скомпрометированный БПЛА больше не может функционировать, так и из-за того, что БПЛА может быть использован злоумышленником для срыва операций, проводимых спасателями, на пример, являясь помехой для других воздушных судов (полеты на вертолете или деятельность других БПЛА). Скомпрометированный БПЛА может также привести к ухудшению ситуационной осведомленности, если БПЛА используются для разведки и сбора данных в зонах бедствия.
- взломанный БПЛА может снизить способность проводить проверки критически важной инфраструктуры и может быть использован в киберфизической атаке для повреждения критически важной инфраструктуры, для защиты которой он изначально был предназначен. Взломанный БПЛА также может создать неизвестный риск, если оператор не будет знать о нарушении.
- если использовать БПЛА для снижения риска во время рейдов, то взломанный БПЛА может снизить общую производительность, что потребует возврата к менее знакомым концепциям работы (CONOPS) и увеличит риск для агентов на местах. Взломанный БПЛА может даже создать неизвестный риск, если оператор не знает о нарушении.

Кроме того, есть дополнительные риски связанные с использованием БПЛА как в гражданской, так и военной сферах, но они будут рассмотрены более детально далее.

Как понятно из представленных выше проблем использования БПЛА, угрозы кибербезопасности БПЛА напрямую связаны с рисками информационной безопасности. В свою очередь риски информационной безопасности возникают в результате возникновения инцидента информационной безопасности, который вызван киберфизическими атаками на БПЛА. И наконец, инцидент приводит к возникновению ущерба. Минимизировать риски

и избежать возникновения ущерба можно, применив совокупность концептов, представленных синим цветом, которые отвечают за реализацию системы защиты БПЛА. Рассмотрим связи представленных концептов на рис. 2.

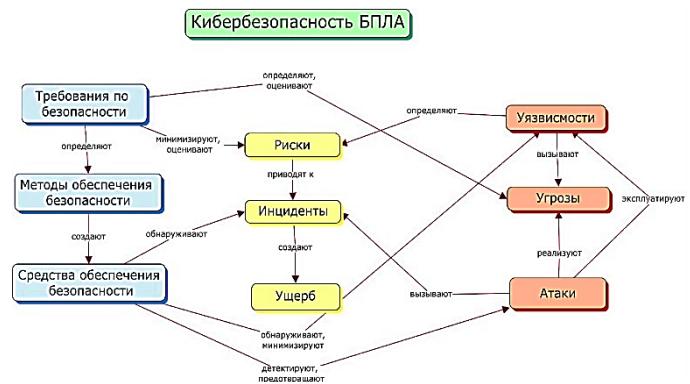


Рис. 2. Связи между концептами, описывающими кибербезопасность БПЛА

Из рис. 2 видно, что все концепты связаны между собой. Поэтому в качестве первого шага при реализации защиты от атак, связанных с нарушением кибербезопасности, как самих БПЛА, так и атак, связанных с использованием БПЛА в качестве атакующих сущностей, могут быть применены подходы, направленные на определение набора векторов атак и поверхностей атаки. Это необходимый шаг, но его недостаточно для разработки концепции обеспечения безопасности полетов и кибербезопасности задач и операций, выполняемых БПЛА. Получив лучшее представление о пространстве угроз, необходимо разработать единую киберстратегию безопасности БПЛА. Эта работа будет включать инвентаризацию и категоризацию платформ БПЛА, понимание возможных последствий, а также вариантов смягчения кибератак, связанных с БПЛА, и отслеживание новых технологических разработок, которые могут изменить пространство угроз. Кроме того, в данной работе представлен набор тестовых стендов, которые позволят продемонстрировать атаки на БПЛА, собрать данные для анализа и предложить методы по защите БПЛА.

Кроме того, исходя из представленной схемы необходимо уделять приоритетное внимание наиболее критическим уязвимостям и находить способы закрыть векторы атак. Чтобы понять варианты смягчения последствий, необходимо отслеживать технологическое развитие систем противодействия нежелательным БПЛА и экспериментировать с новыми методами и технологиями атак. Необходима разработка скоординированной и обновляемой системы мониторинга и вмешательства, поскольку появление новых угроз и типов атак не гарантирует стабильной защиты БПЛА. БПЛА должен уметь обнаруживать свое аномальное поведение для того, чтобы скорректировать его и минимизировать возможные риски и минимизировать возможность возникновения ущерба.

Наконец, необходимо будет контролировать процесс внедрения БПЛА и предвидеть последствия широкого распространения БПЛА. Такие возможности, как автономный полет и использование роев БПЛА, расширят область применения БПЛА. Поскольку БПЛА используются в более широком диапазоне действий, количество

БПЛА, находящихся в воздухе, будет увеличиваться. С точки зрения смягчения угроз, одна из наиболее важных задач в этой новой среде с высокой плотностью БПЛА будет отличать легитимное поведение БПЛА от нелегитимного.

III. АНАЛИЗ КОНЦЕПТА «КИБЕРАТАКА НА БПЛА»

Во всех описанных ранее методиках основной упор делался на анализ сценариев атак, с помощью которых может быть реализована угроза информационной безопасности. Рассмотрим данное понятие более детально, а также рассмотрим сценарии атак в контексте угроз информационной безопасности. Для того чтобы понять какие угрозы характерны для различного типа атак, необходимо описать понятия, которые с атакой связаны и определить возможные значения, которые могут применяться. На рис. 3 представлена концепция кибератаки на БПЛА. Данная концепция отражает укрупненные понятия, которые связаны с кибератакой и позволяет установить связи между ними. Также описание в дальнейшем позволит создать базу знаний о киберугрозах БПЛА и связать концепты и их понятия между собой.

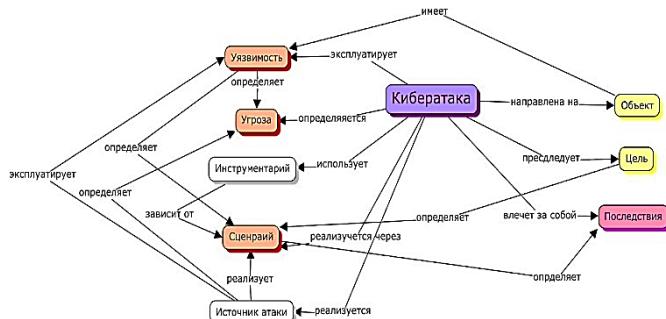


Рис. 3. Составление онтологии для концепта «Кибератака, характерная для БПЛА»

Далее проведем анализ возможных поверхностей атаки. Пример, иллюстрирующий поверхности атаки включает пять основных компонентов, которые определяют границы для связи, как показано на рис. 4. Этими компонентами могут являться – человек-оператор или пункт наземного управления (ПНУ), сам БПЛА, соседние БПЛА в самоорганизующейся группе БПЛА и среда дронов соединение Спутник и БПЛА, это означает, что существуют каналы связи между человеком-оператором и дроном, БПЛА и БПЛА, БПЛА и Спутником, а также между дроном и окружающей средой. Дополнительные детали могут быть получены путем создания компонента для среды обитания человека, когда приложение БПЛА предполагает работу за пределами прямой видимости. Канал связи между человеком-оператором и дроном может обеспечивать работу и управление дроном, либо получение информации от БПЛА. Первым звеном в этой системе является человек, которого можно рассматривать как основного оператора дрона, но передача человеческих команд дрону может осуществляться через различные вычислительные устройства:

- наземный пункт управления (специализированный пульт),
- планшет,
- компьютер,

- программа автопилота,
- программа интеллектуального управления,
- программа группового управления.

Данные компоненты, могут быть выделены в шаблоне изображения, чтобы указать на потенциальные поверхности атаки. На рис. 4 представлены некоторые примеры дополнительных компонентов, таких как навигационное оборудование или соседние БПЛА, которые можно добавить в шаблон, чтобы показать возможные точки атаки.

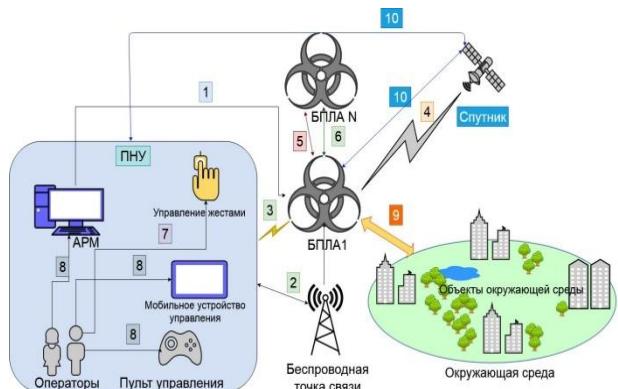


Рис. 4. Анализ поверхности атаки

Рассмотрим более детально рис. 4, чтобы понять и оценить всю поверхность атак на БПЛА.

Основным источником управления БПЛА является пункт наземного управления. При этом управление может осуществляться разными способами. Рассмотрим возможные варианты управления и предполагаемые способы воздействия на них.

Первый способ (обозначенный цифрой 1 на рисунке) – это загрузка управляющей программы в память БПЛА или установка заранее запрограммированной платы управления БПЛА. Данной действие может быть выполнено не только оператором, но и разработчиком, администратором или другим уполномоченным лицом. При этом атака может быть реализована, как на стадии разработки управляющей программы, как путем специального внесения недокументированных возможностей, так и путем допущения ошибок при написании кода программы непреднамеренно.

Кроме того, на сегодняшний день для управления БПЛА зачастую используются интеллектуальные технологии, которые включают в себя нейронные сети. При этом на сегодняшний день актуальной становится использование «отравленных» наборов данных для обучения, когда данные для обучения нейронной сети берутся из открытых источников их трудно верифицировать, так как, во-первых, не существует методологии и инструментария, а, во-вторых, объемы данных очень большие.

Далее, необходимо отметить, что если нейронная сеть разрабатывается с использованием готовых библиотек, приложений, Фреймворков, то это также представляет угрозу, так как злоумышленник мог осознанно внести уязвимости в архитектуру нейронной сети, в программный код. При этом также существует проблема верификации архитектуры нейронной сети, так как от-

существуют средства и программист, разрабатывающий или обучающий нейронную сеть не всегда до конца знает, что происходит «внутри» нее зачастую она выступает «черным ящиком».

При этом даже если в программное обеспечение или плату управления не внесены умышленно недекларированные возможности, все равно необходимо проводить разработку данного компонента с учетом требований по безопасности, что не всегда соблюдается разработчиками.

Второй способ (обозначен цифрой 2 на рисунке) – управления посредством общедоступных беспроводных сетей, таких как 4G, 5G и других сетей. Главное в этом способе то, что имеется посредник между БПЛА и оператором, то есть данные передаются не по прямой линии связи. Данный способ имеет преимущество, он позволяет увеличить дальность действия канала управления, в особенности если для ретрансляции связи используются дополнительные точки беспроводной связи. При этом, безусловно, с точки зрения информационной безопасности недостатков в таком способе управления больше, чем достоинств.

Злоумышленник при такой схеме может атаковать как канал между беспроводной точкой связи и оператором, так и между беспроводной точкой связи и БПЛА, а также и беспроводную точку связи, как дополнительный элемент схемы. Кроме того, злоумышленник может попытаться сам подключиться к беспроводной точке связи, чтобы проникнуть внутрь сети и уже действовать, как легитимный член группы.

Третий способ (обозначен на рисунке цифрой 3) – он подразумевает управление БПЛА с помощью канала прямой связи, как правило таким каналом является радиочастотный канал управления. При этом, данный канал со стороны оператора может быть инициирован с использованием различного типа устройств. Цифрой 8 обозначены варианты устройств, которые может использовать оператор для управления: пульт управления, управление через АРМ, мобильные устройства (планшетный ПК, одноплатный компьютер, мобильный телефон).

При этом реализация самого канала связи зависит от того интерфейса или радио модуля, который доступен на управляющем устройстве, при этом радиоканал может быть реализован на различных частотах (данные вопросы были детально рассмотрены в отчетке по этапу 1). В данном варианте управления вектор атаки может быть направлен на сам канал связи, нарушение его доступности, на перехват управления путем блокирования легитимного оператора и попытки переподключения БПЛА на пульт управления злоумышленника, также подделка данных, поступающих как от оператора к БПЛА, так и в обратном направлении.

Осуществлять управление БПЛА можно также посредство глобальной навигации. Навигационное поле создается спутником связи. При этом, как правило спутник связи транслирует координаты БПЛА и помогает ему ориентироваться на местности, определять положение на карте, а также в пространстве (высоту, долготу, широту). Данный канал является однонаправленным, БПЛА только получает данные от спутника по одному из установленных стандартов передачи навигационной информации. При этом злоумышленник может условно

«перехватить» управление БПЛА, транслируя ему собственные координаты и направляя БПЛА по тому маршруту, который выгоден злоумышленнику. Кроме того, возможна атака на подавления сигнала от глобальной навигационной системы, в таком случае БПЛА может приступить к плану экстренного реагирования на технические сбои. План реагирования может заключаться, как в экстренном приземлении, так и в возвращении на базу или ожидании восстановления нормальных условий.

Таким образом, посредством глобальной навигационной системы злоумышленник может влиять на поведение группы БПЛА, если для ориентирования в пространстве и на местности используются данные от спутников.

Далее в продолжение предыдущего пункта, рассмотрим возможность управления БПЛА посредством использования спутниковой связи (обозначается цифрой 10 на рисунке). Подробно варианты и особенности управления с использованием спутниковой связи были рассмотрены ранее в отчете к этапу 1. Здесь необходимо обозначить, что спутниковая связь является более безопасной, чем беспроводная точка радио связи, и имеет хорошую дальность, так как работает на специализированных частотах, тем не менее способы воздействия со стороны злоумышленника и каналы утечки остаются все тем же как и при использовании беспроводной точки связи, как в способе 2.

Способ управления, обозначенный цифрой 5 представляет особый интерес. В данном случае подразумевается канал оптической связи. Безусловным достоинством данного канала связи является его направленность, использование специализированного оборудования, с позиции информационного воздействия злоумышленнику будет достаточно сложно нарушить безопасность оптического канала связи. Такой канал может быть реализован между БПЛА в группе.

Тем не менее имеется большое количество недостатков. Помимо того, что злоумышленник может оказывать воздействия на физические свойства оптического канала связи, использовать искусственное задымление или установить зеркало на летательный аппарат злоумышленника и поместить его между двумя БПЛА. Оптический канал связи подвержен воздействию естественных природных явлений, данное воздействие обозначено цифрой 9 на рисунке. К таким воздействиям относится очень яркое дневное освещение, турбулентность, облачность, туманность, дождь, снег и т.п. Кроме того, на данный канал действуют вибрации от самих БПЛА, поэтому устойчивость оптического канала зависит от очень многих факторов.

Помимо оптического канала связи для обеспечения передачи управляющих команд или обмена данными между БПЛА в группе может использоваться направленный канал радиосвязи точка-точка. Такое решение с точки зрения физического воздействия является более устойчивым, но более подвержено информационному воздействию. Злоумышленник может попытаться перехватить данные передаваемые по беспроводной среде, осуществить зашумление частоты, на которой происходит передача и т.п.

Не менее важным является канал, обозначенный на рисунке цифрой 9. Он был частично рассмотрен с позиции того, что условия окружающей среды могут влиять на каналы связи, но это далеко не все аспекты. БПЛА использует сенсорную систему и систему технического зрения для получения данных об окружающей среде. При этом никто не мешает воздействовать злоумышленнику на окружающую среду и на объекты окружающей среды, чтобы ввести БПЛА в заблуждение. Тут все зависит от потенциала и целей противника. К примеру, противник может применять средства маскировки для скрытия объектов окружающей среды, внедрять ложные объекты, а также пытаться воздействовать на температуру, уровень задымления и т. п. Таким образом, необходимо отметить, что БПЛА активно взаимодействует с окружающей средой и этот фактор нельзя не учитывать при рассмотрении способа воздействия на БПЛА.

Кроме того, причиной многих авиакатастроф или препятствию действиям БПЛА являются животные и птицы, которые являются обитателями окружающей среды. Возможно, эти факторы могут показаться неуместными, тем не менее злоумышленник может использовать из в свою пользу.

Далее проведем анализ вектора атаки. Вместе с шаблоном поверхности атаки необходимо проанализировать шаблон для иллюстрации векторов, которые могут быть использованы в кибератаке, как представлено на рисунке 5. Иллюстрация вектора атаки отвечает на следующие пять вопросов об исследуемой атаке:

- В чем заключалась ошибка или уязвимость (кибероружие)?
- Как источник атаки смог ее обнаружить (вектор атаки)?
- Откуда источник атаки получил информацию (точка входа в систему или поверхность атаки)?
- Что оказалось слабым звеном в системе (уязвимость системы безопасности)?
- Что произошло (сценарий атаки и последствия)?

Чтобы иметь возможность визуально отображать векторы атак в пространстве угроз БПЛА и кибербезопасности, используется шаблон вектора атаки, который в своей структуре содержит элементы цепочки сценария атаки на кибербезопасности, представленного ранее. В первом типе последовательности анализируется процесс планирования или проникновения, подробно описываются действия, связанные с разведкой и вооружением. В шаблоне основное внимание уделяется процессу сбора разведанных данных и проектированию сценария кибератаки. Следующий тип последовательности касается процесса модификации системы посредством действий по внедрению, эксплуатации и установке. В этой последовательности иллюстраций показаны доставка средства реализации атаки и воздействие на систему идентификации и авторизации в результате изменения сетевых или функциональных настроек. Наконец, последовательность действий по захвату БПЛА представляет действия, связанные с выполнением команд, контролем и действиями. Этот сегмент учитывает условия возникновения угроз связанных с нанесением

повреждений, разрушением, поломкой, сбоев и отказов, связанных с техническими и функциональными характеристиками БПЛА.

Разберем два случая атаки на БПЛА. В первом случае предполагается, что поверхность атаки включает в себя канал прямого управления БПЛА со стороны оператора, который использует в качестве пульта управления персональный компьютер. Непосредственно БПЛА взаимодействует с окружающей средой посредством съема информации. На рис. 5 представлен вектор атаки злоумышленника для данной ситуации. Вектор атаки включает пять основных пунктов, описанных выше.

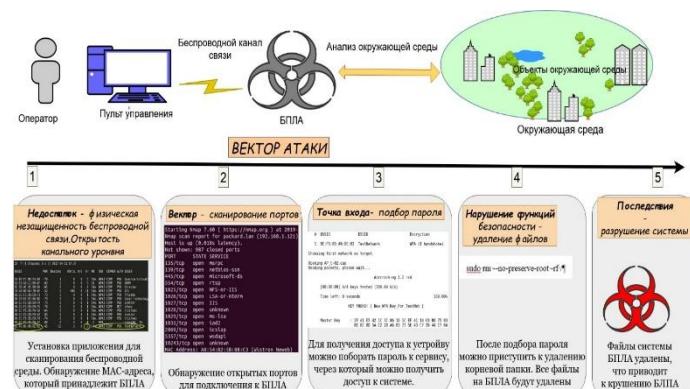


Рис. 5. Пример вектора атаки для поверхности, включающей один БПЛА управляемый оператором

Данный сценарий является достаточно простым и может быть реализован злоумышленником обладающим средним потенциалом, который использует программное обеспечение доступное в сети интернет. При этом последствия атаки могут быть необратимыми, включая полное крушение БПЛА.

Теперь применим данный шаблон для сценария, когда используется группа БПЛА. Данный шаблон является очень удобным и легко трансформируется под другой сценарий, как можно увидеть из рис. 6.

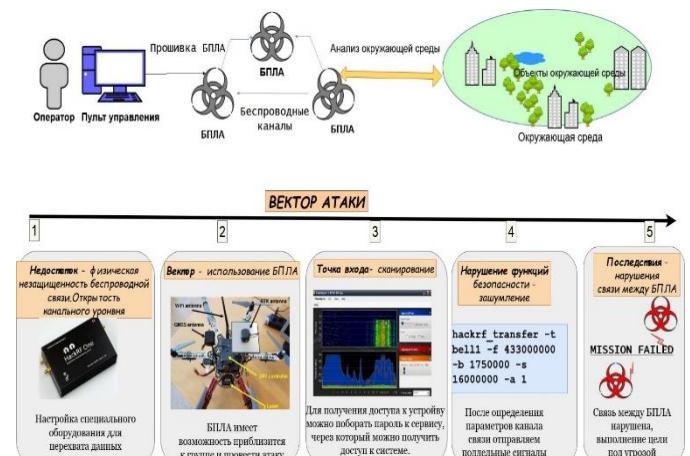


Рис. 6. Пример вектора атаки для поверхности, включающей группу БПЛА

В данном примере поверхность атаки включает группу БПЛА, выполняющую задачи в автономном режиме и использующую беспроводные каналы связи для обмена данными. Группа БПЛА должна успешно выполнить миссию, а цель злоумышленника помешать им. Безус-

ловно, злоумышленнику будет достаточно сложно получить доступ к каждому устройству и провести атаку на отдельные БПЛА.

Поэтому более целесообразным является атака на каналы связи, разрушив связь между БПЛА злоумышленник может сорвать выполнение миссии группой. Для повышения эффективности атаки, злоумышленнику необходимо приблизиться к группе для того, чтобы зашумить сеть более мощным сигналом. Таким образом, в данном шаблоне можно увидеть сразу два типа угроз, одна из которых связана с БПЛА, а другая связана с применением БПЛА в качестве атакующего. Кроме того, нарушение доступности канала связи может привести к запуску сценария экстренного реагирования БПЛА, при котором коптер может либо зависнуть в ожидании появления связи, либо вернуться на базу или осуществить экстренную посадку. Наиболее выгодным для злоумышленника является экстренная посадка, так как получив БПЛА в пользование он может продолжить вектор атаки или начать серию новых атак.

Автор работы [5] составил список из 26 случаев эксплуатации уязвимостей БПЛА. Тщательное изучение метода атаки на целевой беспилотный летательный аппарат и нарушителей, осуществляющих эксплуатирование уязвимостей, выявляет большую совокупную поверхность атаки, широкий диапазон сложности с точки зрения конкретного БПЛА, безопасность которого была нарушена, и низкий потенциал противника, т. е. наличие низкого уровня знаний и технических возможностей. Что касается общей поверхности атаки, изучение задокументированных эксплойтов выявило множество различных уязвимостей, распространенных по всем основным подсистемам БПЛА. Например, успешные эксплойты нацелены на плохую защиту парольной фразы, известные настройки по умолчанию и незащищенные одноранговые сети [6].

Один из самых популярных и самых продаваемых дронов на Amazon уязвим для взлома, как и многие другие. Исследователи из UT-Dallas взломали квадрокоптер DBPOWER. Это один из самых популярных дронов на Amazon, его первоначальная цена - 140 долларов. Квадрокоптер оснащен HD-камерой с возможностью использования гарнитуры VR. Но безопасность беспилотника может быть легко нарушена. Уязвимость заключается в том, что злоумышленник может разрушить БПЛА во время полета. Когда дрон взломан, хакер может загружать частные фото и видео, даже без участия жертвы.

IV. АТАКИ, СВЯЗАННЫЕ С ПЕРЕХВАТОМ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА

Угроза обратного инжиниринга Yuneec Q500 Zigbee. Угроза перехвата информации по беспроводным каналам связи. Угроза перехвата управления.

Структурно-функциональная характеристика: Радиопротокол Rev Eng

Уязвимость: технологическая – уязвимость системы связи – физическая незащищенность беспроводных каналов связи.

Объект атаки: Модель Yuneec Q500 Turphoon – это специальная летающая платформа для аэрофотосъемки. Летающая платформа включает 3-х осевой подвес CGO2-GB, и видеокамеру Full HD 1080p (60, 50 или 48

кадров в секунду) с функцией видео записи и съемки 12-мегапиксельных фото. Встроенный видеопередатчик обеспечивает передачу видео, которое можно в реальном времени просматривать прямо на экране включенной в комплект персональной наземной станции ST10c передатчиком управления.

Цель:

- Нарушение свойств самоорганизующейся группы БПЛА: Нарушение конфиденциальности, нарушение доступности.
- По типу получаемой выгоды: прямая выгода (получение БПЛА в пользование).
- По степени воздействия на систему: средняя (свойства БПЛА не нарушаются, он становится недоступен легитимному владельцу)
- Источник: злоумышленник, нарушитель.
- По уровню потенциала: средний.
- Сценарий атаки:
- По расположению субъекта по отношению к объекту атаки: внешняя.
- По количеству этапов: многоэтапная.
- По характеру воздействия: активная.
- По уровню инфраструктуры, на который атака воздействует: сетевой уровень, уровень приложений.

Инструментарий: программное обеспечение – самостоятельно разработанное ПО. Аппаратное обеспечение – коммерческое АО.

Программное обеспечение - SmartRF Packet Sniffer 2 включает в себя следующие компоненты:

- Инструмент ПК (SmartRF Sniffer Agent) для настройки и связи с устройством захвата,
- Прошивка, позволяющая использовать панели запуска CC13xx или CC26xx в качестве устройства захвата,
- Исходный код прошивки,
- Диссекторы для Wireshark (диссекторы IEEE 802.15.4ge и TI Radio Packet Info).

Таким образом, для перехвата трафика необходимо набор радио модулей, позволяющих прослушивать радиочастоты, и имеющаяся в свободном доступе библиотека для декодирования протоколов связи.

Описание атаки: Перехват информации возможен благодаря доступному в сети анализатору пакетов [7]. SmartRF Packet Sniffer – это программное приложение для ПК, которое может отображать и сохранять радиопакеты, захваченные слушающим радиочастотным устройством. Устройство захвата подключается к ПК через USB. Поддерживаются различные протоколы радиочастотной связи. Packet Sniffer фильтрует и декодирует пакеты и отображает их удобным способом, например, Wireshark для устройств CC13xx и CC26xx.

Агент SmartRF Sniffer Agent используется для настройки устройства захвата и взаимодействия с ним, а также для пересылки пакетов в Wireshark. Агент SmartRF Sniffer работает в Windows 7 и Windows 10.

Особенности:

- Сниффер пакетов для сетей IEEE 802.15.4, ZigBee и Thread,
- Анализатор пакетов для сетей IEEE 802.15.4ge (стек TI 15.4),
- Сниффер пакетов для протокола TI EasyLink,
- Сниффер пакетов для Bluetooth® Low Energy.

Поверхность и вектор атаки представлена на рис. 7.

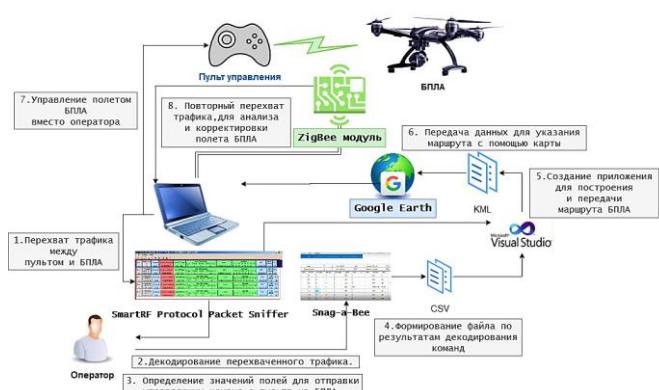


Рис. 7. Поверхность атаки на каналы связи управления полетом с указанием вектора атаки

После того, как пакеты перехвачены, все еще сложно понять, что они обозначают, данные в перехваченных пакетах плохо распознаются. Для того чтобы декодировать пакеты используется приложение Snag-a-Bee [8]. Snag-A-Bee очень прост и использовался для декодирования протокола сообщений Zigbee для дрона Yuneec Q500. При этом данное приложение может быть использовано и для других случаев. Однако необходимо для начала определить, какие команды, с пульта оператора в каких полях протокола отображаются. Для этого нужно производить изменения, анализировать значения в протоколе.

Путем анализа того какое значение в крайнем правом столбике изменилось в результате выполнения команды, передаваемой на БПЛА, можно понять, какое поле за что отвечает и в дальнейшем подделывать пакеты необходимым образом, изменения значения полей [9]. В крайнем левом столбце можно указывать свои комментарии к строке таблицы, как видно команды как правило обозначают изменение координат БПЛА в пространстве, как это делает с помощью пульта управления. Yuneec Google Earth будет декодировать протокол сообщений Yuneec и создавать файлы KML для Google Earth для чтения с частотой 1 Гц. Это приложение используется после того, как протокол Yuneec был декодирован с помощью приложения SnagABee. Чтобы это работало, приложение Texas Instrument Zigbee Sniffer должно быть запущено и транслировать UDP-сообщения [10]. Сценарий реализации угрозы представляет большой интерес. Так как его логика может быть применена и к другим протоколам беспроводной связи, тем более что представленный сивер позволяет анализировать различные протоколы связи [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были рассмотрены возможные сценарии перехвата управления БПЛА. Можно сделать следующие основные выводы, исходя из рассмотренных сценариев:

- перехват управления БПЛА осуществляется посредством беспроводных каналов связи. То есть злоумышленник должен иметь доступ к каналу связи, что осуществляется достаточно легко [12]. Далее нарушитель должен знать протокол связи, который используется иметь модуль беспроводной связи, который позволяет ему подключиться к БПЛА [13].
- если злоумышленник имеет доступ к каналу связи, то все дальнейшие сценарии осуществляются через одинаковый вектор [14]. Для этого необходимо определить какие порты открыты и какие сервисы доступны, для проведения дальнейших атак.
- в зависимости от точки входа в систему определяются активные действия злоумышленника [15]. Имеются три типовые точки входа в систему, которые связаны с подключением к доступному сервису и созданию поддельных пакетов, для обрыва текущего соединения [16].
- далее у злоумышленника открывается широкий спектр возможностей, которые он может осуществить для нарушения технологического процесса функционирования БПЛА [17]. Сценарии атак может быть большое количество, но, по сути, они сводятся к трем типам последствий. Это полное нарушение функционирования и крах БПЛА, получение БПЛА в пользование злоумышленника и использование захваченного БПЛА для атак на другие объекты [18, 19].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российской научного фонда № 21-79-00194, <https://rscf.ru/project/21-79-00194/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Joshi D. Commercial Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Analysis – Industry Trends, Companies and What You Should Know, Business Insider , August 8, 2017.
2. Ley Best K., Jon Schmid, Shane Tierney, Jalal Awan, Nahom M. Beyene, Maynard A. Holliday, Raza Khan, Karen Lee. How to Analyze the Cyber Threat from Drones Background, Analysis Frameworks, and Analysis Tools. Published by the RAND Corporation, Santa Monica, Calif. Copyright 2020 RAND Corporation.
3. Statt N. “Skydio’s AI-Powered Autonomous R1 Drone Follows You Around in 4K,” TheVerge, February 13, 2018.
4. “Drone Use Reaches „Landmark Level“ in Harvey Disaster Response,” InfoGram , Vol. 17, No. 37, September 14, 2017.
5. Walters S. “How Can Drones Be Hacked? The Updated List of Vulnerable Drones and Attack Tools,” webpage, October 29, 2016.
6. Shostack A. Threat Modeling: Designing for Security, Hoboken, N.J.: Wiley, 2014.
7. Электронный ресурс [<https://www.ti.com/tool/PACKET-SNIFFER>] <https://yuneecpilots.com/threads/yuneec-q500-zigbee-protocol-decoded.15522/>. – Режим доступа свободный (дата обращения: 12.11.2020).

8. Электронный ресурс [SnagABee] [<https://github.com/CodeMakes/ItGo/SnagABee>] режим доступа свободный (дата обращения: 12.08.2021).
9. Restituyo R.; Thaier Hayajneh. Vulnerabilities and Attacks Analysis for Military and Commercial IoT Drones // Published in: 2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON). 8-10 Nov. 2018. – DOI: 10.1109/UEMCON.2018.8796596.
10. Faughnan M.S., Hourican J.B., MacDonald G.C., Srivastava M., Wright J.P.A., Haines Y.Y., et al. Risk Analysis of Unmanned Aerial Vehicle Hijacking and Methods of its Detection // Proceedings of the 2013 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium, 2013-04-16.
11. Rodger E.Z. and Tranter W.H. Noise in modulation systems // in Principles of Communications: Systems Modulation and Noise, Hoboken, NJ, USA:Wiley, 1995. – Vol. 8. – P. 349-353.
12. Poisel R. Electronic warfare and hybrid spread spectrum systems // in Modern Communications Jamming Principles and Techniques, Fitchburg, MA, USA:Artech House, 2011. – P. 705-737.
13. Simon M.K., Omura J.K., Scholtz R.A. and Levitt B.K. Classical spread-spectrum communications // in Spread Spectrum Communications Handbook, New York, NY, USA:McGraw-Hill, 2002. – Vol. 2. – P. 405-462.
14. Strasser M., Pöpper C. and Čapkun S. Efficient uncoordinated FHSS anti-jamming communication // Proc. 10th ACM Int. Symp. Mobile Ad Hoc Netw. Comput., 2009. – P. 207-218.
15. Lai J.P. and Ye Z.Q. Result analysis of the interference of wide-band and high-frequency noise // Radar Ecm. – Sep. 2002. – Vol. 3. – P. 48-52. [online] Available: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-LDDK200203009.htm.
16. Vyas S.K., Maurya S. and Singh V.P. Electromagnetic and particle-in-cell simulation studies of a high power strap and vane CW magnetron // IEEE Trans. Plasma Sci. – Oct. 2014. – Vol. 42, No. 10. – P. 3373-3379.
17. Jun L., Andrian J.H. and Zhou C. Bit error rate analysis of jamming for OFDM systems // Proc. Wireless Telecommun. Symp. – Apr. 2007. – P. 1-8,
18. Cavoukian A. Privacy and Drones: Unmanned Aerial Vehicles, Toronto, ON, Canada:Information Privacy Commissioner of Ontario, 2012. – P. 1-30,
19. Li F., Li Z., Lou D. and Jiang Y. Analysis and research of synchronization technique for frequency-hopping communication systems // Proc. Int. Conf. Comput. Sci. Netw. Technol. – Dec. 2011. – P. 1968-1972.

Оценка методов искусственного интеллекта для детектирования дронов на основе радиочастотной активности

Мудрук Никита Николаевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
mudruk@sfedu.ru

Трегубенко Масим Дмитриевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
mtregubenko@sfedu.ru

Басан Елена Сергеевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ebasan@sfedu.ru

Абрамов Евгений Сергеевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
abramoves@sfedu.ru

Аннотация. В наше время с помощью современных технологий очень легко работать с разного рода данными. Их часто используют для анализа, чтобы определить наиболее важные элементы. Следовательно, наборы данных являются очень ценным ресурсом. В этой статье описывается разработка классификатора, который определяет максимум информации о беспилотных летательных аппаратах на основе данных радиочастотного диапазона. Классификатор представляет собой свёрточную нейросеть, которая способна распознавать наличие дрона и тип дрона. Результаты показали, что разработанный продукт работает лучше существующих аналогов.

Annotation. The Nowadays, with the help of modern technologies, it is very easy to work with various kinds of data. They are often used for analysis to determine the most important elements. Therefore, data sets are a very valuable resource. This article describes the development of a classifier that determines the maximum information about unmanned aerial vehicles based on radio frequency data. The classifier is a convolutional neural network that can recognize the presence of a drone and the type of drone. The results showed that the developed product works better than existing analogues.

Ключевые слова беспилотные летательные аппараты, машинное обучение, нейронные сети, классификация, большие данные.

Keywords *unmanned aerial vehicles, machine learning, neural networks, classification, big data.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Из-за возможности удаленной записи видео и транспортировки вещей спрос на беспилотные летательные аппараты не прекращает расти. По данным компании «Мвидео-Эльдорадо» за первые шесть месяцев россияне приобрели 95000 летательных аппаратов на сумму около 1,3 млрд рублей [1]. Компания отмечает, что в настоящее время рынок растет вдвое быстрее, чем в 2020 году.

Киберпреступления и вредоносные атаки становятся более актуальными по мере увеличения использования беспилотных летательных аппаратов. Злоумышленники могут использовать свой собственный беспилотник для достижения своих целей. Поэтому для обнаружения беспилотных летательных аппаратов необходимы механизмы обнаружения и идентификации.

Некоторые из недавних примеров – атаки беспилотников на аэропорт Абха и нефтяное месторождение в Саудовской Аравии Aramco, где обе атаки повлекли за собой огромные экономические потери [2, 3]. Аналогичным образом война дронов в Карабахе: беспилотники изменили конфликт между Азербайджаном и Арменией [4]. Следовательно, использование беспилотных летательных аппаратов создает опасные угрозы конфиденциальности и безопасности.

Злонамеренное использование беспилотных летательных аппаратов дает новую почву для исследований, экспериментов и разработок. В последние годы было создано несколько подходов к обнаружению беспилотных летательных аппаратов, и большинство из этих подходов используются в алгоритмах, основанных на таких характеристиках, как звук, зрение, радар и радиочастотный сигнал.

В статьях [5][6] авторы представили обзор литературы, посвященный концепции обнаружения беспилотных летательных аппаратов, применяя классификацию и обнаружение объектов с использованием технологий машинного обучения. Применение принципов машинного обучения облегчает обнаружение дрона в бинарной классификации, например «есть дрон» или «нет дрона». Однако, некоторые исследования в литературе выходят за рамки всем привычной классификации и переходят к многоклассовой классификации, которая определяет

типы беспилотных летательных аппаратов. В первой части статьи разъясняются различные методы, такие как идентификация, обнаружение, классификация, верификация, параметры дронов и подходы к обнаружению группы дронов на основе радиолокационных сигналов и с использованием методов машинного обучения. Аналогичным образом исследователи попытались использовать акустические данные, собранные с помощью датчиков звука беспилотных летательных аппаратов. Ученые предложили использовать скрытую модель Маркова и модель смеси Гаусса для идентификации и классификации беспилотных летательных аппаратов на основе акустических данных. Однако, большинство предлагаемых моделей оспариваются из-за различий в скорости и расстояниях полета дронов.

В статье [7] авторы предложили усовершенствованный метод обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов на основе радиочастотной активности. Предложенные методы генерировали данные в ходе серии экспериментов в реальной наружной среде с использованием типа дрона Phantom 4. Кроме того, используется метод оценки частоты с использованием статистических параметров радиочастотных сигналов, полученных от беспилотного летательного аппарата, который помогает идентифицировать присутствие беспилотного летательного аппарата в контролируемой зоне. Применение наряду с ликвидацией помех привело к их подавлению и повышению производительности обнаружения.

Были изучены существующие решения задачи идентификации типа дронов на основе радиочастотной активности. Авторы набора данных DroneRF [8] представляют решение, основанное на полностью связной нейронной сети, с точностью 84,5%. В статье [9] с помощью ансамблевого алгоритма XGBoost достигли точности 90,73%. В статье [10] авторы представляют свою сверточную нейронную сеть с показателями точности 85,8%.

Ориентируясь на проблему обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов, пролетающих без разрешения в воздушном пространстве для совершения вредоносных действий, нашим конечным результатом должно быть недорогое решение на основе базы радиочастотных сигналов.

Противодействие БПЛА может включать в себя нарушение доступности, нарушение функциональных возможностей БПЛА, нарушение передачи данных по каналам связи, вмешательство и манипуляция каналом связи, подмена передаваемой информации. Большинство уязвимостей, которые могут быть проэксплуатированы для нарушения безопасности БПЛА связаны с каналами связи. Если рассматривать противодействие с точки зрения реализации сценариев атак, то можно сказать, что необходимо реализовать внешнюю атаку на БПЛА.

Любой сценарий внешней атаки начинается с разведки. Для начала необходимо обнаружить и получить информацию о структурно-функциональных характеристиках БПЛА. Информацию о БПЛА можно получить по нескольким демаскирующим признакам:

- шумовые (акустические);
- оптические (видимые);

- инфракрасные (тепловые);
- радиолокационные (радио);
- радиочастотные.

Задачей исследования является получение информации о каналах связи с целью дальнейшего вмешательства в их работу путем проведения информационных атак. При этом атака на канал связи может быть реализована путем выполнения последовательности следующих действий:

Кибер-проникновение (CI/CyI). Проникновение в защищённую систему, анализ ее программного обеспечения, для дальнейшего взлома, отключения, манипуляций, и воздействию на физические параметры системы.

Кибер-манипуляция (CM/CYМ). После проникновения злоумышленник манипулирует программным обеспечением системы, чтобы нанести ей ущерб. Например, используя программное обеспечение для отключения питания системы.

Кибер-нападение (CA/CyA). После проникновения злоумышленник нарушает работу непосредственно самого программного обеспечения, нарушает работу служб и сервисов, в том числе путем внедрения вредоносного ПО.

Кибер-вторжение (CR/CyR). Если после выполнения предыдущих действий система должна остаться работоспособной, после этого злоумышленник пытается получить данные о паролях, данных электронной почты и т.п.

Вмешательство в работу беспроводных каналов связи, перехват информации по радиоканалам и радиолокационных сигналов, а также нахождение приемопередатчиков и повторителей связи является важной тактической задачей в рамках противодействия вражеским БПЛА и системам связи противника. Такие способы воздействия на отдельные БПЛА, как: перехват, глушение, изменение местоположения путем использование более мощного сигнала – являются фундаментальными при реализации атак на группы БПЛА.

Целью данной работы является создание системы обнаружения беспилотных летательных аппаратов и их типов с помощью методов машинного обучения, которая превосходит по точности существующие аналоги.

Результатом работы является разработанный многоклассовый классификатор, представляющий собой сверточную нейросеть, на языке Python с использованием фреймворков Keras [11] и Tensorflow [12].

В будущем функциональность системы будет значительно расширена. В частности, планируется увеличить набор данных для обучения, расширив количество различных типов беспилотных летательных аппаратов.

II. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БПЛА

В этом разделе рассматриваются полностью связная и сверточная нейросеть, а также описан набор данных на основе радиочастотных показателей, который имеет три выборки и их распределение.

A. FCNNs (полносвязная нейронная сеть)

Полносвязная нейронная сеть – это сеть, в которой каждый нейрон связан со всеми остальными нейронами, находящимися в соседних слоях, и в которой все связи направлены строго от входных нейронов к выходным. На рис. 1 представлена её архитектура.

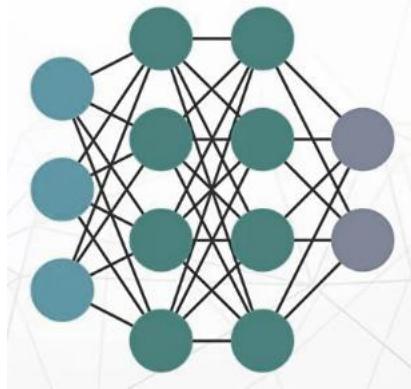


Рис. 1. Архитектура полносвязной нейронной сети

B. CNN (свёрточная нейронная сеть)

Следующая архитектура, представленная на рис. 2 – это свёрточная нейронная сеть, которая в подавляющем большинстве случаев используется для работы с изображениями (хотя одномерные свёрточные сети могут применяться также для работы с текстом). Они обрабатывают информацию примерно по тому же принципу, что и человеческий глаз.

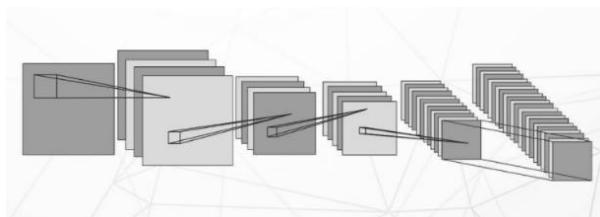


Рис. 2. Архитектура свёрточной нейронной сети

Основная особенность свёрточных нейронных сетей заключается в том, что в них нет связи между всеми нейронами соседних слоев, как это было в полносвязных сетях. Здесь каждый нейрон последующего слоя смотрит на небольшой кусочек (3×3 или 5×5 пикселей) предыдущего слоя и обобщает с него информацию для передачи дальше.

Чтобы сеть была более устойчива к небольшим сдвигам параметров объектов, необходимо уменьшать раз мерность входного тензора. Эту задачу выполняет слой пулинга, чтобы сократить количество вычислений. Принцип действия таков: если на предыдущей операции свёртки уже были выявлены некоторые признаки, то для дальнейшей обработки настолько подробное описание не требуется, и оно уплотняется до менее подробного. К тому же фильтрация уже ненужных данных помогает не переобучаться. Слой пулинга, как правило, вставляется после слоя свёртки перед слоем следующей свёртки.

Такая архитектура позволяет поэтапно выделять разные признаки на разных слоях от низкоуровневых к высокоуровневым, после чего идет передача наиболее

высокоуровневых признаков в полносвязную нейронную сеть, которая уже проводит окончательную классификацию и выдает результат – допустим, присутствует дрон или нет.

III. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ БПЛА

A. Подготовка набора данных

С помощью глубокого и точного анализа ситуаций различного характера для принятия решений необходимо огромное количество данных. Данная работа не является исключением.

Для тестирования и обучения моделей методом глубокого обучения необходимы большие наборы данных. В статье [8] авторами был предложен сгенерированный в лаборатории набор данных с открытым исходным кодом. Он состоит из совокупности записей радиочастотных сигналов, снятых с беспилотных летательных аппаратов, таких как Bebop, AR и Phantom. Они тестировались в разных режимах работы, а также в простой активности. Набор содержит в себе 454 записи, каждая из которых содержит в себе около 1 миллиона образцов, показывающих амплитудное значение сигнала. Дополнительно к сигналам беспилотных летательных аппаратов поставляются записи, которые указывают на отсутствие какой-либо активности. Такой набор очень сильно облегчает обнаружение беспилотных летательных аппаратов, используя характеристики радиочастотного сигнала. Режимы работы, в которых тестировались вышеупомянутые дроны, были разнообразные: подключение, зависание, режим полёта, режим полёта и запись. Активности дронов по сравнению с их отсутствием в наборах данных находятся в пропорциях 82% на 18%. Последнее облегчает анализ по предотвращению шума. При помощи этого набора данных могут быть получены не только результаты обнаружения беспилотных летательных аппаратов, но и классификация типов.

Полное распределение данных для решения задачи классификации марки типов дронов в наборе данных DroneRF представлено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. НАБОР ДАННЫХ DRONERF
ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ ДРОНОВ

Class	Segments	Samples (x106)	Sample Percentage (%)
No Drone	41	820	18.06
Bebop	84	1680	37
AR	81	1620	35.68
Phantom	21	420	9.25

В итоге получился набор данных, который содержит 22700 экземпляров и 2047 признаков. Данный набор данных был разделен на три выборки: обучающую, валидационную и тестовую. Соотношение выборок 70:10:20 соответственно. Выборки были разделены пропорционально данным исходного набора данных.

Выборки в сегментах представляют амплитуду полученных строк радиочастотных сигналов во временной области. Сегменты в базе данных хранятся в виде файлов значений, разделенных запятыми (csv), что позволяет легко загружать и интерпретировать базу данных

drone RF на любом программном обеспечении. Метаданные для каждого сегмента в базе данных включены в его имя файла. Он содержит сегмент двоичного уникального идентификатора (BUI), чтобы различать режим БПЛА, за которым следует символ, чтобы определить, является ли он первой или второй половиной сегмента, и номер его сегмента. Например, третий сегмент второй половины радиочастотного спектра с BUI = 11010, прозрачный БПЛА с режимом полета № 3, будет иметь следующее имя файла: «11010H3.csv».

В экспериментальном стенде контроллеры полета и мобильные телефоны использовались для отправки и приема радиочастотных команд на анализируемые БПЛА и от них для изменения режима полета. Управление БПЛА с помощью мобильного телефона требует мобильных приложений, специально разработанных для каждого БПЛА. «FreeFlight Pro», «AR.FreeFlight» и «DJI Go» – это бесплатные мобильные приложения, разработанные для управления дронами Bebop, AR и Phantom соответственно. Радиочастотные команды, перехваченные двумя радиочастотными приемниками, каждый приемник обменивается данными с ноутбуком (процессор Intel Core i5-520M 2,4 ГГц, 4 ГБ ОЗУ, работает под управлением Windows 7 64-бит) через кабель PCIe, получение, обработка и хранение данных выполняются программами, разработанными нами в LabVIEW Communications System Design Suite.

Процесс радиочастотного зондирования и захвата требовал радиочастотных приемников для перехвата связи беспилотника с его контроллером полета, подключенным к ноутбукам, которые отвечают за выборку, обработку и хранение записанных радиочастотных сигналов в базе данных. БПЛА, которые использовались в эксперименте, работают по-разному с точки зрения подключения (например, Bebop и Phantom используют WiFi 2,4 ГГц и 5 ГГц с различной шириной полосы). В этой работе предполагается, что все беспилотники используют WiFi, работающий на частоте 2,4 ГГц. Тем не менее, рабочая частота беспилотника может быть обнаружена с использованием различных методов, таких как пассивное сканирование частоты.

Во-первых, необработанные образцы РЧ получают с использованием двух программно-определяемых радио реконфигурируемых устройств National Instruments USRP-2943 (NI-USRP): РЧ-приемник NI USRP-2943R. Поскольку каждый РЧ-приемник имеет максимальную мгновенную ширину полосы 40 МГц, оба приемника должны работать одновременно, чтобы по крайней мере захватить технологический спектр, такой как WiFi (то есть 80 МГц), где первый приемник захватывает нижнюю половину полосы частот, а второй фиксирует верхнюю половину. После этого захваченные РЧ-данные передаются от приемников NI-USRP на два стандартных ноутбука с помощью комплектов интерфейса Peripheral Component Interconnect Express (PCIe). Наконец, выборка, обработка и хранение данных выполняются программами, которые мы разработали в LabVIEW Communications System Design Suite. Программы разработаны стандартным способом LabVIEW с использованием лицевой панели и блок-схем.

Распределения выборок показаны на рис. 3–5.

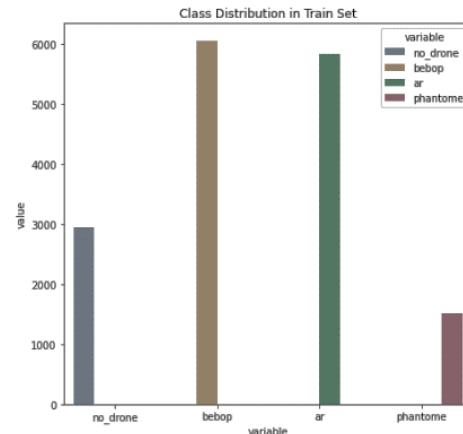


Рис. 3. Тренировочная выборка

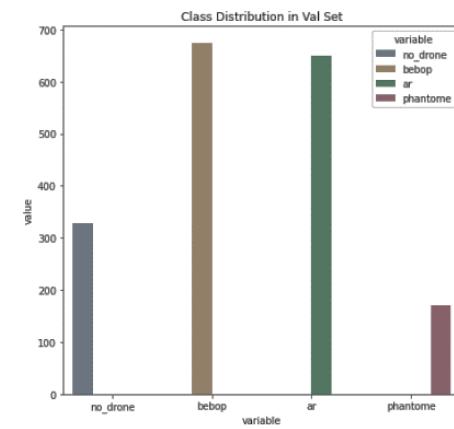


Рис. 4. Валидационная выборка

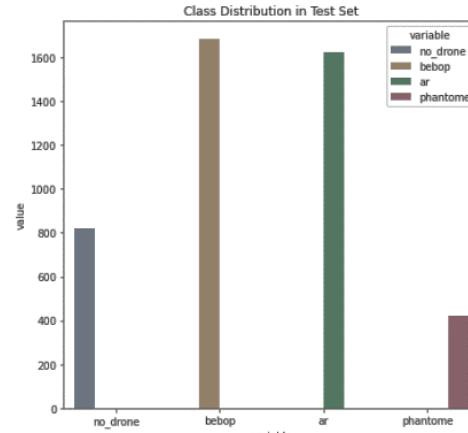


Рис. 5. Тестовая выборка

B. Архитектура нейронной сети

Проведенный анализ методов детектирования БПЛА показал, что данная задача решаема с использованием методов глубокого обучения. При этом в большинстве работ отмечено, что наиболее подходящим инструментом для решения данных задач является использование сверточных нейронных сетей. При этом существуют даже готовые наземные системы детектирования БПЛА в радиочастотном диапазоне, которые заявляют высокую точность обнаружения и дальность действия.

Одной из задач исследования является не только детектирование БПЛА, но и сбор подробной информации о нем с целью дальнейшего противодействия. При этом методы противодействии БПЛА, как правило сводятся к атакам на систему навигации, зашумление радиоканала, подавление с помощью РЭБ или физического воздействия, что подтверждается патентными исследованиями.

На рис. 6 представлена разработанная архитектура сверточной нейронной сети.

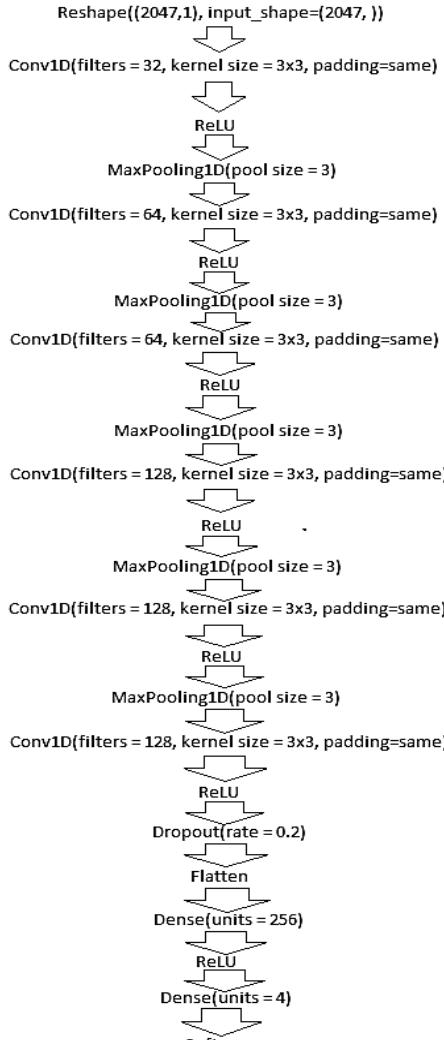


Рис. 6. Архитектура разработанного решения

Она состоит из шести слоев одномерной свертки, пяти слоев одномерного максимального пулинга. Функцией активации у слоев свертки выступает ReLU.

Чтобы избежать проблемы переобучения, используется слой dropout, который отсеивает 20% нейронов. Далее используется полносвязный слой с 256 нейронами и ReLU в качестве активации. Последним слоем идет полносвязный слой с 4 выходами (количество классов). В качестве функции активации используется softmax.

IV. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

A. Метрики оценки эксперимента

В качестве метрик для классификации знаков по всему набору данных в данном исследовании использовались: accuracy, precision и recall.

Для определения точности модели по каждому классу рассчитывалась нормализованная confusion matrix для данного набора данных.

Accuracy – доля правильных ответов алгоритма, которая вычисляется по формуле 1:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (1)$$

где ТР – количество истинно-положительных срабатываний, TN – количество истинно-отрицательных срабатываний, FP – количество ложно-положительных срабатываний, FN – количество ложноотрицательных срабатываний модели.

Эта метрика интуитивно понятна, но плохо работает в случае дисбаланса классов. В дополнение к accuracy были введены метрики precision и recall, которые представлены на формулах 2 и 3:

$$\text{precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (2)$$

$$\text{recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (3)$$

Метрики precision и recall фокусируются на ложно-положительных и ложноотрицательных срабатываниях соответственно. Чтобы объединить эти их в единый результат была введена f1-мера, которая представлена на формуле 4:

$$2 * \frac{\text{precision} * \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} = \frac{\text{tp}}{\text{tp} + \frac{1}{2}(\text{fp} + \text{fn})} \quad (4)$$

B. Параметры обучения

В качестве функции потерь использовалась категориальная кросс-энтропия, которая представлена на формуле 5:

$$\text{Loss} = - \sum_{i=1}^{\text{output size}} y_i * \log y_i \quad (5)$$

где y_i – i-е скалярное значение в выходных данных модели, y_i – соответствующее целевое значение, output size – количество скалярных значений в выходных данных модели.

В качестве оптимизатора использовался Adam со скоростью обучения 0.00001. Обучение длилось 4000 эпох. В конце каждой эпохи проводилась проверка на валидационной выборке. Модель с лучшей accuracy сохранялась.

Параметры компьютера, который использовался для обучения, представлены в табл. 2:

ТАБЛИЦА 2. ПАРАМЕТРЫ КОМПЬЮТЕРА

ЦПУ	Видеокарта	Память	ОС
Intel Core i7 8750H 2.20 GHz	Nvidia GeForce GTX 1060M 6GB	16 GB	Ubuntu 18.04 LTS

C. Экспериментальное исследование

Поиск оптимальной архитектуры нейронной сети и параметров ее обучения осуществлялся экспериментальным путем. Были обучены 2 полносвязные нейронные и 2 сверточные нейронные сети. Полносвязные сети отличаются количеством внутренних слоев. Одна из них со-

держит 3 внутренних слоя, другая 4. Функция активации у всех полносвязных слоев - ReLU. Сверточные нейронные сети отличаются друг от друга количеством слоев пулинга. Одна сеть содержит 3 слоя пулинга (после первого, второго и пятого слоев свертки). Вторая CNN содержит 5 слоев пулинга (после каждого слоя свертки). В качестве функции потерь у всех нейросетей использовалась категориальная кросс-энтропия.

Оптимальные гиперпараметры нейронных сетей и результаты их обучения вы можете увидеть в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

<i>model</i>	<i>learning rate</i>	<i>epoch number</i>	<i>accuracy</i>
FCNN 3 layers	0.0001	300	0.84
FCNN 4 layers	0.0001	300	0.85
CNN 3 max pool	0.00001	2000	0.86
CNN 5 max pool	0.00001	4000	0.92

V. РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные метрики работы модели представлены в табл. 4:

ТАБЛИЦА 4. МЕТРИКИ КАЧЕСТВА ИТОГОВОЙ МОДЕЛИ

<i>accuracy</i>	<i>precision</i>	<i>recall</i>	<i>f1</i>
0.9202	0.9433	0.9413	0.9414

В результате работы была получена сверточная нейронная сеть, которая превосходит лучший из найденных аналогов по метрикам accuracy, precision, recall и f1 на 2%.

Матрица неточностей – это матрица размера N на N, где N – это количество классов. Столбцы этой матрицы резервируются за экспертными решениями, а строки за решениями классификатора. Когда классифицируется документ из тестовой выборки, то инкрементируется число, стоящее на пересечении строки класса, который вернул классификатор и столбца класса, к которому действительно относится документ. Правильные ответы представлены на главной диагонали матрицы.

Матрицы неточностей для тестовой выборки в абсолютном и процентном соотношениях представлены на рис. 6 и 7.

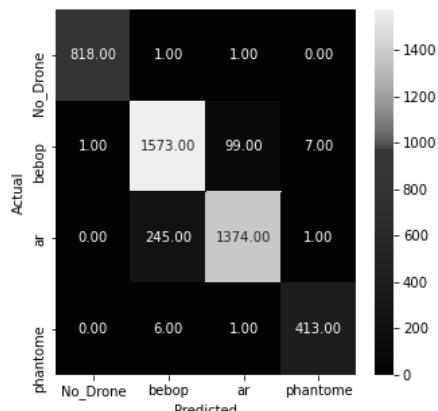


Рис. 7. Матрица неточностей в абсолютных значениях

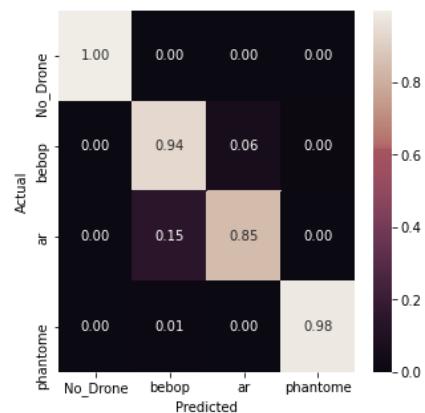


Рис. 8. Матрица неточностей в процентных долях

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы статьи разработали решение, которое может обнаруживать беспилотные летательные аппараты, а также определять и классифицировать их типы с помощью методов машинного обучения. Обучение проходило на базе доступного в сети набора данных. Набор данных содержит записи радиочастотной-активности, состоящие из 227 записанных сегментов, собранных от 3 разных БПЛА, а также записи фоновой радиочастотной-активности без БПЛА. Данные были собраны радиочастотными приемниками, которые перехватывают сообщения беспилотника с модулем управления полетом. Приемники подключены к двум ноутбукам через кабели PCIe, на которых запускается программа, отвечающая за выборку, обработку и хранение измеренных радиочастотных данных в базе данных. Набор данных состоит из записанных сегментов фоновой радиочастотной активности в отсутствии БПЛА и сегментов БПЛА, работающих в разных режимах, таких как: выключение, включение и подключение, зависание, полет и запись видео. Записи составляют 10,25 секунд фоновой радиочастотной активности и приблизительно 5,25 секунд радиосвязи БПЛА для каждого режима полета. Это привело к созданию базы данных радиочастотной активности БПЛА объемом более чем 40 ГБ данных, охватывающих различные сигнатуры радиочастотной активности. Всего имеется 227 сегментов, каждый сегмент состоит из двух частей одинакового размера, каждая из которых содержит 1 миллион выборок, что составляет в общей сложности 454 файла записи. Результаты показали, что разработанный продукт работает лучше существующих аналогов. Важной задачей дальнейшего исследования является расширения набора обучающих данных для расширения возможностей проведения разведывательных операций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта научно-исследовательской магистратуры Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета ГрМГ/21-01-КТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электронный ресурс: [Online]. <https://www.vedomosti.ru/finance/news/2021/07/29/879977-chistaya-pribil-sbera-v-pervom-polugodii-virosla> [доступ 17 августа 2021].
2. Chmaytelli M. and R. El Gamal. Houthi drone attack on saudi oilfield causes gas fire, output unaffected, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/us-yemen-saudi-oil-attack/houthi-drone-attackon-saudi-oilfield-causes-gas-fire-output-unaffected-idUSKCN1V705R>.
3. Khalid T. Yemen's houthis attack saudi abha airport with drones, houthi tv says, Jul. 2019. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/us-yemen-security-saudi-airport/yemens-houthis-attacksaudi-abha-airport-with-drones-houthi-tv-says-idUSKCN1UK2OH>.
4. Ding G., Wu Q., Zhang L., Lin Y., Tsiftsis T.A., and Yao Y. An Amateur Drone Surveillance System Based on the Cognitive Internet of Things // IEEE Commun. Mag. – 2018. – Vol. 56, No. 1. – P. 29-35.
5. Shi X., Yang C., Xie W., Liang C., Shi Z., and Chen J. AntiDrone System with Multiple Surveillance Technologies: Architecture, Implementation, and Challenges // IEEE Commun. Mag. – 2018. – Vol. 56, No. 4. – P. 68-74.
6. Al-sa M.F., Al-ali A., Mohamed A., and Khattab T. RF-based drone detection and identification using deep learning approaches: An initiative towards a large open source drone database // Futur. Gener. Comput. Syst. – 2019. – Vol. 100. – P. 86-97. – DOI: 10.1016/j.future.2019.05.007.
7. Al-Sa'd M.F., Mhd Saria; Mohamed, Al-Ali A., Mohamed A., Khattab T., Erbad A. DroneRF dataset: A dataset of drones for RF-based detection, classification, and identification, 2019. – URL: <http://dx.doi.org/10.17632/f4c2b4n755.1>.
8. Olusiji O. Medaiyese, Abbas Syed, and Adrian P. Lauf. Machine Learning Framework for RF-Base, IEEE.
9. Kim B.K., Kang H., Park S. Drone classification using convolutional neural networks with merged doppler images // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – 2017. – Vol. 14 (1). – P. 38-42. – <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2016.2624820>.
10. Team K. 2021. Keras: the Python deep learning API. [online] Keras.io. Available at: <https://keras.io/> [Accessed 17 August 2021].
11. TensorFlow. 2021. TensorFlow. [online] Available at: <https://www.tensorflow.org/> [Accessed 17 August 2021].

Секция IV

**ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

DOI: 10.18522/syssyn-2021-32

**Краевая задача для непрерывно-неоднородного
сферического слоя**

Воропаева Людмила Вячеславовна

Институт автоматики и информационных технологий

Самарский государственный технический университет

Самара, Россия

ludmilav2@yandex.ru

Аннотация. Представлен метод решения краевой задачи для непрерывно-неоднородного сферического слоя в состоянии равновесия при известных смещениях точек на поверхностях, с отсутствием нагрузок. Предполагается, что упругие коэффициенты непрерывно зависят от радиуса. Для получения решения используются разложение искомого вектора смещений по собственным вектор-функциям классического дифференциального оператора Ламе на сфере. Поиск коэффициентов разложения сводится к асимптотическому интегрированию систем линейных дифференциальных уравнений второго порядка. Результаты расчётов с использованием полученных аналитических решений показывают, что смещение и напряжение решающим образом зависят от неоднородности среды.

Annotation. A method for solving the boundary value problem for a continuously inhomogeneous spherical layer in equilibrium at known displacements of points on surfaces, with no loads, is presented. It is assumed that the elastic coefficients continuously depend on the radius. To obtain the solution, we use the decomposition of the desired displacement vector by the eigenvector functions of the classical differential Lame operator on the sphere. The search for expansion coefficients is reduced to the asymptotic integration of systems of linear differential equations of the second order. The results of calculations using the obtained analytical solutions show that the displacement and stress depend decisively on the inhomogeneity of the medium.

Ключевые слова: неоднородные среды, анизотропия, сферическая оболочка, асимптотические решения.

Keywords: *inhomogeneous media, anisotropy, spherical shell, asymptotic solutions.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование деформаций в композиционных материалах имеет большое значение при проектировании сферических конструкций, используемых в различных отраслях промышленности: в газонефтехимии, атомной энергетике, авиастроении, судостроении, и т.д.

Игнорирование анизотропии непрерывно-неоднородных по толщине пространств, пластины и оболочки вызывает искажения в расчётах деформаций. С практической точки зрения неоднородные анизотропные оболочки обычно моделируются как поперечно-изотропные среды с осями симметрии, перпендикулярными слоям с одинаковыми характеристиками. При построении решений требуется накладывать условия в точках, лежащих на границах изотропных слоёв. Если параметры, характеризующие упругие свойства материала, можно описать непрерывными функциями точки, естественным будет представление решений для смещений и напряжений модели непрерывной неоднородной анизотропной среды, не связанное с разделением на слои. Соотношения классической теории упругости (уравнения равновесия и соотношения Коши) в этом случае остаются без изменений, уравнения совместности деформаций могут быть получены аналогично, как в классической теории упругости [1–4].

Из-за математических трудностей такому моделированию неоднородных сред не уделялось большого внимания: изучение анизотропных деформаций вместе с неоднородностью делает задачи слишком сложными, чтобы допускать замкнутую форму решения для смещения и напряжения. С 60-х г.г. прошлого века стали исследоваться осесимметричные задачи для неоднородных тел с анизотропией. Большой объём работ был посвящен расчёту перемещений напряжений в изотропных средах

с изменяющимся по глубине модулем Юнга или сдвига по степенному, линейному или по экспоненциальному закону. В основном работы были посвящены контактным задачам упругих неоднородных плоских пространств и цилиндров с анизотропией по толщине. Такие осесимметричные задачи позволяют выписывать решения в численно-аналитическом виде [5–8].

Целью представленного исследования является разработка метода расчёта, позволяющего реализовать модель непрерывно-неоднородной анизотропной сферической оболочки, с коэффициентами Ламе, зависящими от радиуса оболочки, находящейся в статическом состоянии при известных смещениях точек на поверхностях. Постановка соответствующих центрально-симметричных задач позволяет найти решения в аналитическом и численном виде, проанализировать влияние на них неоднородности материала.

Закон Гука с упругими параметрами Ламе λ и μ , зависящими в данном случае от координат точек, уравнения равновесия и соотношения Коши позволяют получить для модели непрерывно-неоднородной среды уравнение относительно вектора смещений.

Уравнение относительно вектора смещений при условиях, наложенных на параметры λ и μ в любой точке среды,

$$\mu > 0, \lambda + 2\mu > 0,$$

генерирует сильно-эллиптический оператор, теоремы единственности и существования решений краевых задач для которого известны [9, 10].

Решение краевых задач для вектора смещений u и неоднородного сферического слоя ищется путём разложения вектора смещений в ряд по собственным ортогональным вектор-функциям оператора Ламе

$$Lu = \mu \Delta u + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} u, \quad (L)$$

где λ, μ – упругие постоянные.

Выражения для сферических составляющих вектора смещений были получены Ламе методом разделения переменных в виде рядов по поверхностным функциям Лапласа и их производным [11, 12]. Векторные гармоники Ламе позволяют решить проблему поиска нужных комбинаций поверхностных сферических гармоник и их производных, чтобы выполнить произвольно заданные перемещения (напряжения) на поверхности сферы. В теории потенциала ответа на этот вопрос нет. Строгое математическое обоснование метод векторных гармоник получил в работах по применению представления групп вращения к векторным полям [7, 13].

Для радиальных компонент разложения решения получаются системы дифференциальных уравнений второго порядка. Для гладких λ и μ в работе применяется метод асимптотического построения решения систем для больших номеров векторных гармоник Ламе [14–20]. Системы приводятся к системам дифференциальных уравнений первого порядка с малым параметром, обратным номеру гармоники, и точками поворота в начале координат. Сначала, согласно алгоритму [18], строятся формальные асимптотические решения сингулярно-

возмущённых систем первого порядка. Затем доказывается их асимптотическая устойчивость. Системы дифференциальных уравнений интегрируются в квадратурах в некоторых случаях, когда, например, коэффициенты Ламе являются квадратичными функциями радиальной компоненты.

Аналитическое представление решений задач для неоднородной сферической оболочки в виде рядов по сферическим гармоникам реализовано численно. Результаты вычислений показывают влияние неоднородности среды на полученные решения.

II. ЗАДАЧА СТАТИКИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Рассматривается задача о равновесии упругого неоднородного изотропного сферического слоя в пространстве R^3 , связанного с общепринятыми ортогональными координатами (r, θ, φ) , $0 < r_0 < r < r_1 < \infty$, параметры Ламе которого непрерывно зависят от радиальной координаты r : $\mu = \mu(r)$, $\lambda = \lambda(r)$.

A. Постановка задачи

Найти регулярный вектор u , удовлетворяющий в шаровом слое уравнению

$$\begin{aligned} \mu(r) \Delta u + (\lambda(r) + \mu(r)) \operatorname{grad} \operatorname{div} u + \operatorname{div} u \operatorname{grad} \lambda(r) + \\ 2(\operatorname{grad} \mu(r) \operatorname{grad} u + [\operatorname{grad} \mu(r) \times \operatorname{rot} u]) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

и граничным условиям на поверхностях сфер:

$$u(r_0) = f^0(\theta, \varphi), \quad u(r_1) = f^1(\theta, \varphi). \quad (2)$$

B. Разложение решения по собственным функциям оператора Ламе

Решение задачи (1), (2) представлено в виде разложения решения по собственным вектор-функциям классического оператора (L):

$$u(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=-n}^n \left[u_n^{(k)}(r) L_n^{(k)}(\theta, \varphi) + v_n^{(k)}(r) M_n^{(k)}(\theta, \varphi) + w_n^{(k)}(r) N_n^{(k)}(\theta, \varphi) \right], \quad (3)$$

где $L_n^{(k)}(\theta, \varphi) = S_n^{(k)}(\theta, \varphi) e_r$, $M_n^{(k)}(\theta, \varphi) = r \operatorname{grad} S_n^{(k)}(\theta, \varphi)$, $N_n^{(k)}(\theta, \varphi) = r \operatorname{rot} L_n^{(k)}(\theta, \varphi)$, – векторные гармоники Ламе,

$$S_n^{(k)}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{2n+1}{4\pi}} \frac{(n-k)!}{(n+k)!} P_n^{(k)}(\cos \theta) e^{ik\varphi} \quad \text{– ортого-}$$

нормированные функции Лапласа, $n = 0, 1, 2, \dots$, $|k| \leq n$.

Формула обращения для векторного разложения (3), справедливая для любой кусочно-непрерывной функции на сфере, известна [11, 12]:

$$\begin{aligned} e_r u_n^{(k)}(r) + n(n+1) \left(e_\theta v_n^{(k)}(r) + e_\varphi w_n^{(k)}(r) \right) = \\ = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi u_r(r, \theta, \varphi) L_n^{(k)}(\theta, \varphi) + u_\theta(r, \theta, \varphi) M_n^{(k)}(\theta, \varphi) + u_\varphi(r, \theta, \varphi) N_n^{(k)}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta \end{aligned}$$

Из формулы обращения следует:

$$u_n^{(k)}(r) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi u_r(r, \theta, \varphi) S_n^{(k)} \sin \theta d\theta,$$

$$n(n+1)v_n^{(k)}(r) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \left[u_\theta(r, \theta, \varphi) \frac{\partial S_n^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{u_\varphi(r, \theta, \varphi)}{\sin \theta} \frac{\partial S_n^{(k)}}{\partial \varphi} \right] \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (4)$$

$$n(n+1)w_n^{(k)}(r) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \left[\frac{u_\theta(r, \theta, \varphi)}{\sin \theta} \frac{\partial S_n^{(k)}}{\partial \varphi} - u_\varphi(r, \theta, \varphi) \frac{\partial S_n^{(k)}}{\partial \theta} \right] \sin \theta d\theta d\varphi.$$

Пусть $v(r) = \lambda(r) + 2\mu(r)$.

Радиальные функции $u_n^{(k)}(r)$ и $v_n^{(k)}(r)$ в разложении (3) находятся из решений систем ДУ второго порядка

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \begin{bmatrix} u_n^{(k)}(r) \\ v_n^{(k)}(r) \end{bmatrix} + A(r, n) \frac{\partial}{\partial r} \begin{bmatrix} u_n^{(k)}(r) \\ v_n^{(k)}(r) \end{bmatrix} + B(r, n) \begin{bmatrix} u_n^{(k)}(r) \\ v_n^{(k)}(r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где

$$A(r, n) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 2\nu & -(v-\mu)n(n+1) \\ v-\mu & 2\mu \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v' & 0 \\ 0 & \mu' \end{bmatrix},$$

$$B(r, n) = \frac{1}{r^2} \begin{bmatrix} -2\nu - \mu n(n+1) & (v+\mu)n(n+1) \\ 2\nu & -vn(n+1) \end{bmatrix} + \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 2(v-2\mu)' & -(v-2\mu)'n(n+1) \\ \mu' & -\mu' \end{bmatrix}$$

и граничных значений на поверхностях сфер $u_n^{(k)}(r_i)$, $v_n^{(k)}(r_i)$, $i = 0, 1$.

Функции $w_n^{(k)}(r)$ находятся отдельно из уравнений

$$\mu(r) \frac{d^2 w_n^{(k)}(r)}{dr^2} + \left(\frac{2}{r} \mu(r) + \mu'(r) \right) \frac{dw_n^{(k)}(r)}{dr} - \left(\frac{n(n+1)}{r^2} \mu(r) + \frac{1}{r} \mu'(r) \right) w_n^{(k)}(r) = 0 \quad (6)$$

и граничных условий $w_n^{(k)}(r_i)$, $i = 0, 1$.

Решения систем (5) и уравнений (6) требуется исследовать при $n \rightarrow \infty$.

Введём малый параметр $\varepsilon = \frac{1}{n(n+1)}$, $n = 1, 2, \dots$

C. Асимптотическое представление решений систем (5)

Системы дифференциальных уравнений (5) эквивалентны системам первого порядка:

$$\varepsilon \frac{dx_n^{(k)}}{dr} = (M_0(r) + \varepsilon M_1(r)) x_n^{(k)}, \quad (7)$$

$$x_n^{(k)}(r) = \begin{bmatrix} \frac{du_n^{(k)}(r)}{dr}, \frac{dv_n^{(k)}(r)}{dr}, u_n^{(k)}(r), v_n^{(k)}(r) \end{bmatrix}^T,$$

$$M_0 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{v+\mu}{r\nu} & \frac{\mu}{r^2\nu} & -\frac{v+\mu}{r^2\nu} + \frac{(v-2\mu)'}{r\nu} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{v+\mu}{r^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} -\frac{2\nu}{r} - \nu' & 0 & \frac{2\nu}{r^2} - \frac{2(v-2\mu)'}{r} & 0 \\ -\frac{\nu-\mu}{r} & -\frac{2\mu}{r} - \mu' & -\frac{2\nu}{r^2} - \frac{\mu'}{r} & \frac{\mu'}{r} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Теорема 1. В шаровом слое $0 < r_0 < r < r_1 < \infty$ при $v \neq \mu$, $\mu \neq 0$, $\mu, v \in C^1(r_0 < r < r_1)$, формальные асимптотические решения систем (7) имеют вид

$$x_\varepsilon^{(k)} = P \left(\sum_{j=0}^5 \left(\sqrt[4]{\varepsilon} \right)^j Q^{(j)} \right) \text{diag} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}}, \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}}, \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}}, \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}} \right] c, \quad (8)$$

Здесь c - постоянный четырёхмерный вектор-столбец,

$$P = \begin{bmatrix} \frac{\kappa}{r^5} & -\frac{\sqrt[4]{\varepsilon}^3}{2r^4} & -\frac{\kappa}{r^5} & -\frac{\sqrt[4]{\varepsilon}^3}{2r^4} \\ \frac{1}{r^5} \left(\sqrt{\varepsilon} \kappa + \varepsilon^{\frac{(2\nu-\mu)'+v}{4\mu}} \right) & \sqrt[4]{\varepsilon}^5 \kappa & \frac{1}{r^5} \left(\sqrt{\varepsilon} \kappa + \varepsilon^{\frac{(2\nu-\mu)'+v}{4\mu}} \right) & -\sqrt[4]{\varepsilon}^5 \kappa \\ \left(\sqrt{\varepsilon} + \varepsilon \right) \frac{\kappa}{r^4} & -\sqrt[4]{\varepsilon} \frac{\kappa}{r^3} & \left(\sqrt{\varepsilon} - \varepsilon \right) \frac{\kappa}{r^4} & \sqrt[4]{\varepsilon} \frac{\kappa}{r^3} \\ \varepsilon \frac{\kappa}{r^4} & 0 & -\varepsilon \frac{\kappa}{r^4} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\kappa = \frac{v-\mu}{4\mu}.$$

Матрицы $Q^{(j)}$ однозначно определяются из рекуррентных соотношений:

$$Q^{(0)} \Lambda = \Lambda Q^{(0)},$$

$$Q^{(1)} \Lambda = \Lambda Q^{(1)} + \Phi^{(1)} Q^{(0)},$$

$$(Q^{(0)})' + Q^{(2)} \Lambda = \Lambda Q^{(2)} + \Phi^{(1)} Q^{(1)} + \Phi^{(2)} Q^{(0)},$$

$$(Q^{(1)})' + Q^{(3)} \Lambda = \Lambda Q^{(3)} + \Phi^{(1)} Q^{(2)} + \Phi^{(2)} Q^{(1)} + \Phi^{(3)} Q^{(0)},$$

...

$$(Q^{(j)})' + Q^{(j+2)} \Lambda = \Lambda Q^{(j+2)} + \Phi^{(1)} Q^{(j+1)} + \Phi^{(2)} Q^{(j)} + \Phi^{(3)} Q^{(j-1)} + \dots, \quad j = 1, 2, \dots,$$

$$\Lambda = \frac{1}{r} \text{diag}[1, 1, -1, -1].$$

Матрицы $\Phi^{(j)}$, $j = \overline{1, 5}$, получены путём приведения систем (7) к расщеплённому виду [18–20].

Теорема 2. В условиях теоремы 1 формальные решения (8) при $\varepsilon \rightarrow 0$ являются асимптотическими:

$$x_\varepsilon^{(k)} = P \left(\sum_{i=0}^{m-1} \left(\sqrt[4]{\varepsilon} \right)^i Q^{(j)} + O \left(\left(\sqrt[4]{\varepsilon} \right)^m \right) \right) \left(\frac{r}{\rho} \right)^{\frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}} \cdot \text{diag}[1, 1, 0, 0] \cdot c, \quad \text{для } \rho > r_0,$$

$$x_\varepsilon^{(k)} = P \left(\sum_{i=0}^{m-1} \left(\sqrt[4]{\varepsilon} \right)^i Q^{(j)} + O \left(\left(\sqrt[4]{\varepsilon} \right)^m \right) \right) \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}} \cdot \text{diag}[0, 0, 1, 1] \cdot c, \quad \text{для } \rho < r_1, \quad m \geq 1.$$

D. Асимптотическое представление решений уравнений (6)

Уравнения (5) эквивалентны системам первого порядка

$$\varepsilon \frac{dy_n^{(k)}}{dr} = (M_0(r) + \varepsilon M_1(r)) y_n^{(k)}, \quad (9)$$

$$y_n^{(k)}(r) = \begin{bmatrix} \frac{dw_n^{(k)}(r)}{dr}, w_n^{(k)}(r) \end{bmatrix}^T,$$

$$M_0 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{r^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M_1 = \begin{bmatrix} -\frac{2}{r} + \frac{\mu'}{\mu} & -\frac{\mu'}{r\mu} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Теорема 3. В шаровом слое $0 < r_0 < r < r_1 < \infty$ для $\mu \in C^1(r_0 < r < r_1)$ формальные асимптотические решения систем (8) имеют вид:

$$y_\varepsilon^{(k)} = P \left(\sum_{j=0}^2 (\sqrt{\varepsilon})^j Q^{(j)} \right) \cdot \text{diag} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}}, \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}} \right] \cdot c, \quad (10)$$

здесь:

c – постоянный вектор-столбец размерности 2,

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ r\sqrt{\varepsilon} & r\sqrt{\varepsilon} \end{bmatrix}.$$

Матрицы $Q^{(j)}$ однозначно определяются из рекуррентных соотношений:

$$(Q^{(j-1)})' + Q^{(j)} \Lambda = \Lambda Q^{(j)} + \Phi^{(1)} Q^{(j-1)} + \Phi^{(2)} Q^{(j-2)},$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, \Lambda = \frac{1}{r} \text{diag}[1, -1].$$

Матрицы $\Phi^{(j)}$, $j = 1, 2$, получены путём приведения систем (9) к расщеплённому виду [18–20].

Теорема 4. В условиях теоремы 3 формальные решения (10) при $\varepsilon \rightarrow 0$ являются асимптотическими:

$$y_\varepsilon^{(k)} = P \left(\sum_{i=0}^{m-1} (\sqrt{\varepsilon})^i Q^{(j)} + O\left((\sqrt{\varepsilon})^m\right) \right) \left(\frac{r}{\rho} \right)^{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}} \cdot c, \quad \text{для } \rho > r_0,$$

$$y_\varepsilon^{(k)} = P \left(\sum_{i=0}^{m-1} (\sqrt[4]{\varepsilon})^i Q^{(j)} + O\left((\sqrt[4]{\varepsilon})^m\right) \right) \left(\frac{\rho}{r} \right)^{\frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}} \cdot c, \quad \text{для } \rho < r_1, m \geq 1.$$

E. Частные решения для радиальных компонент.

Из (8), (10) выделяются общие решения для радиальных компонент $u_n^{(k)}$, $v_n^{(k)}$, $w_n^{(k)}$. Границные значения $u_n^{(k)}(r_i)$, $v_n^{(k)}(r_i)$, $w_n^{(k)}(r_i)$, $i = 0, 1$, на поверхностях сфер определяются из (4). Все системы линейных уравнений для определения констант интегрирования систем дифференциальных уравнений для $u_n^{(k)}$ и $v_n^{(k)}$ при $n = 1, 2, \dots$ будут совместными. Однозначно определяются постоянные интегрирования и в решении для $w_n^{(k)}$.

Для нулевой гармоники поиск постоянных интегрирования упрощается.

F. Представление решения задачи в виде ряда по собственным функциям оператора (L)

Полученная аналитическая форма представления решения задачи (1), (2) для смещения точек неоднородной сферической оболочки в виде рядов (3) не является замкнутой. Результаты вычислений показывают влияние неоднородности среды на полученные решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ломакин В.А. Теория упругости неоднородных тел. – М.: Изд-во МГУ, 1967. – 367 с.
2. Работнов Ю.Н. Механика деформированного твердого тела. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
3. Новацик В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
4. Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости. – М.: Госиздат технико-теорет. л-ры, 1955. – 491 с.
5. Wang, Cheng-Der & Pan, Evgheni & Tzeng, Chi-Shiang & Han, Feng & Liao, Jyh-Jong. Displacements and Stresses Due to a Uniform Vertical Circular Load in an Inhomogeneous Cross-Anisotropic Half-Space. International Journal of Geomechanics. 6. 10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:1(1).
6. Аленцын А.Г. Волны Релея в неоднородном упругом слое // Прикладная математика и механика. – 1964. – Т. 28. – С. 880-888.
7. Петрашев Г.И. Распространение волн в анизотропных упругих средах. – М.: Наука, 1980. – 280 с.
8. Айзикович С.М. Контактные задачи теории упругости для полупространства и полу平面, неоднородных по глубине // Статические и динамические смешанные задачи теории упругости. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1983. – С. 121-131.
9. Трёхмерные краевые задачи теории упругости и термоупругости. Купрадзе В. Д. и др., 2 изд., М., 1976.
10. Кондратьев В.А., Олейник О.А. Краевые задачи для системы теории упругости в неограниченных областях. Неравенства Корна // УМН. – 1988. – Т. 43. – Вып. 5 (263). – Р. 55-98.
11. Lame G. Lecons sur la theorie mathematique de l'elasticite des corps solides, deuxieme edition. – Gauthier-Villars, Paris, 1866.
12. Улитко А.Ф. Метод собственных векторных функций в пространственных задачах теории упругости. – Киев: Наук. Думка, 1979. – 261 с.
13. Гельфанд И.М., Минлос Р.А., Шапиро З.Я. Представления групп вращений и группы Лоренца, их применения. – М.: Наука, 1958.
14. Turrittin H.L. Asymptotic expansion of solutions of systems of ordinary linear differential equations containing a parameter // Matematika. – 1957. – Vol. 1, No. 2. – P. 29-60; Contributions to the theory of nonlinear oscillations, v. II, Annals of Mathematics Studies. – 1952. – Vol. 29. – P. 81-116.
15. Вазов В. Асимптотические разложения решений обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1968. – 464 с.
16. Федорюк М.В. Асимптотические методы для линейных обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1977. – 354 с.
17. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1968. – 576 с.
18. Шкиль Н.И., Старун И.И., Яковец В.П. Асимптотическое интегрирование линейных систем дифференциальных уравнений с вырождениями. – Киев: Выща школа, 1991. – 207 с. – ISBN 5-11-003731-0.
19. Воропаева Л.В. Асимптотическое интегрирование линейных систем дифференциальных уравнений, связанных с равновесием неоднородного упругого шарового слоя // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды восьмой Всероссийской научной конференции с международным участием, Самара, 15–17 сентября 2011 года / Редакционная коллегия: В. П. Радченко (отв. редактор), О. А. Репин, Э. Я. Рапопорт, М. Н. Саушкин (отв. секретарь). – Самара: Самарский государственный технический университет, 2011. – С. 40-45.
20. Воропаева Л.В. Условия диагонализации главной матрицы системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений при построении асимптотического по параметру решения // Математическое моделирование и краевые задачи: Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием: в 2х т., Самара, 27–30 мая 2019 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2019. – С. 28-31.

Электродинамические модели приземного слоя атмосферы

Куповых Геннадий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kupovyh@sedu.ru

Клово Александр Георгиевич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
klovo_ag@mail.ru

Кудринская Татьяна Владимировна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
tvkudrinskaya@sedu.ru

Тимошенко Дмитрий Владимирович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
dmitrytim@sedu.ru

Аннотация. Представлен анализ математических моделей электродинамических процессов в приземном слое для различных метеорологических условий в атмосфере. Обсуждается проблема происхождения глобальных и локальных вариаций электрического поля вблизи поверхности земли. Электродинамическая структура приземного слоя атмосферы определяется электродным эффектом, а нестационарные электрические процессы вблизи поверхности земли обусловлены совместным действием, как глобальных возмущений вне приземного слоя, так и действием локальных генераторов в нем.

Annotation. The analysis of mathematical models of electrodynamic processes in the surface layer for various meteorological conditions in the atmosphere is presented. The problem of the origin of global and local variations of the electric field near the Earth's surface is discussed. The electrodynamic structure of the surface layer of the atmosphere is determined by the electrode effect, and non-stationary electrical processes near the earth's surface are caused by the joint action of both global disturbances outside the surface layer and the action of local generators.

Ключевые слова: атмосфера, приземный слой, аэроионы, электрическое поле, турбулентность, электродный эффект, унитарная вариация, проводимость, электрический ток.

Keywords: atmosphere, surface layer, aeroions, electric field, turbulence, electrode effect, conductivity, electric current.

I. ВВЕДЕНИЕ

Приземный слой атмосферы характеризуется наличием турбулентных процессов обмена, поверхностных источников ионизации (радиоактивности) и источников аэрозольных частиц, как естественного, так и искусственного происхождения. Электродинамическое состояние приземного слоя определяется так называемым электродным эффектом, который определяется совокупность процессов, происходящих в ионизированной среде вблизи поверхности земли и приводящих к появлению зависимости локальных электрических характеристик атмосферы от высоты [1, 2].

Значительное влияние на электродинамические характеристики приземного слоя оказывают метеорологические факторы. В условиях «хорошей погоды» толщина электродного слоя меняется от нескольких десятков сантиметров до десятков метров. Присутствие аэрозольных частиц в атмосфере, являющихся стоком для аэроионов, оказывает влияние на параметры электродного эффекта, и при достаточно больших концентрациях электрическое состояние приземного слоя может определяться только тяжелыми ионами, образовавшимися за счет взаимодействия аэрозоля с аэроионами. Подробная теория стационарного электродного эффекта в атмосфере приведена в работе [2].

Суточные вариации электрического поля у поверхности земли имеют две компоненты: глобальную и локальную. В роли глобальной компоненты обычно выступает унитарная вариация потенциала ионосферы, имеющая утренний минимум (03-05) UT и вечерний максимум (19-20) UT [3, 4]. Причиной локальных вариаций являются возмущения электрического поля, обусловленные объемным зарядом у поверхности земли вследствие электродного эффекта и влиянием турбулентного перемешивания [3, 4].

В работах [5] рассмотрены задачи об установления стационарного электрического поля в приземном слое при «включении» тока и об установлении периодических вариаций электрического поля в турбулентном приземном слое, вызванных колебаниями тока. В первом случае электрическое поле в приземном слое квазистационарно, т.е. «подстраивается» к изменениям плотности электрического тока. Во втором – масштаб распределения электрического поля вблизи поверхности земли уменьшается по сравнению со стационарным случаем. Амплитуда колебаний электрического поля, проносящего сверху в приземный слой уменьшается, при этом существует сдвиг фазы колебаний электрического поля по отношению к колебаниям плотности электрического тока.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основной задачей электродинамики приземного слоя атмосферы является нахождение пространственно-временных распределений электрических характеристик: концентраций полярных аэроионов ($n_{1,2}$) и электрического поля (E) в различных условиях. Электродинамическая модель горизонтально-однородного свободного от аэрозоля приземного слоя в приближении электродного эффекта [1, 2] состоит из ионизационно-рекомбинационных уравнений для полярных аэроионов и уравнения Пуассона для электрического поля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} & \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} E) - \frac{\partial}{\partial z} (D_T(z, t) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} (v(z, t) \cdot n_{1,2}) = \\ & = q - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} & = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2) \end{aligned} \quad (1)$$

где $b_{1,2}$ – подвижности полярных аэроионов, α – их коэффициент рекомбинации, $D_T = D_1 z$ – коэффициент турбулентной диффузии аэроионов, v – вертикальная составляющая конвективного переноса аэроионов, q – скорость ионизации воздуха, e – элементарный заряд, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Для исследования математической модели (1) используем методы теории подобия. Обезразмерим уравнения, используя характерные значения и масштабы входящих в них физических величин:

$$\begin{aligned} t' &= t/T, \quad z' = z/l_1, \quad n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty, \quad E' = E/E_\infty, \\ n_\infty &= \sqrt{q_\infty/\alpha}, \quad l_1 = D_1 \cdot \tau, \quad \tau = (q_\infty \alpha)^{-1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

Знак « ∞ » означает верхнюю границу электродного слоя. Тогда получаем уравнения в безразмерной форме:

$$\begin{aligned} \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} & - \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z} \right) \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} E') + v \tau \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z} = \\ & = \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} & = \gamma (n'_1 - n'_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Характерное время протекания метеорологических гидродинамических процессов (T) составляет несколько часов, тогда как время жизни аэроиона $\tau = 250$ с (при $q_\infty = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ и $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$). Поэтому во многих случаях стационарное приближение для электродинамических задач правомерно.

В систему (3) входят два безразмерных параметра (критерии подобия):

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad \gamma = \frac{e}{\epsilon_0} \frac{n_\infty}{E_\infty} l_1, \quad \chi = \frac{v}{D_1}. \quad (4)$$

В случае $|\gamma| \ll 1$ электрическим полем объемного электрического заряда можно пренебречь. Когда параметр $\xi_{1,2} \geq 1$, имеет место классический электродный эффект [2], то есть пространственно-временное распределение аэроионов в приземном слое обусловлено только электрическими силами. Если $\xi_{1,2} \ll 1$, имеет место турбулентный электродный эффект [2], когда перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха. Если $\xi_{1,2} \ll 1$, имеет место приближение сильного турбулентного перемешивания [2], когда перенос аэроионов осуществляется только турбулентной диффузией. при значении параметра $\chi \ll 1$, конвективным переносом аэроионов можно пренебречь. Если значения множителя D_1 коэффициента турбулентной диффузии сопоставимо или меньше v ($D_1 \leq v$), конвективный перенос аэроионов играет значительную роль в формировании профилей электрических характеристик [6].

Далее рассмотрим различные случаи электродного эффекта в атмосфере, но без учета конвективного переноса, так как вопрос его моделирования сложен и требует отдельного обсуждения за рамками данного доклада.

С точки зрения математического моделирования электродного эффекта классический и турбулентный случаи отличаются условиями на нижней границе – поверхности земли для аэроионов. В первом случае концентрация отрицательных аэроионов равна нулю, а положительных – нет. Во втором случае значения положительной и отрицательной концентраций равны нулю, но граничные условия задаются на некоторой высоте, которая определяется параметром шероховатости, зависящим от числа Рейнольдса, что эквивалентно определению характера динамического взаимодействия турбулентного потока с земной поверхностью. В случае аэродинамически гладкой поверхности (классический электродный эффект) значения параметра шероховатости равно нулю.

III. ПРИБЛИЖЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ЭФФЕКТА

В случае выполнения условия $\xi_{1,2} \geq 1$ из системы (1) следует:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} & \pm b_{1,2} \frac{\partial (E \cdot n_{1,2})}{\partial z} = q(z) - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} & = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Введем в (5) обозначения (2) и получим следующие безразмерные уравнения:

$$\tau \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} \pm \tau b_{1,2} E_\infty \frac{\partial (n'_{1,2} E')}{\partial z} = 1 + \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2. \quad (6)$$

В уравнениях (6) параметр $L_{nE} = b_{1,2} E_\infty \tau$ является некоторым характерным пространственным масштабом, имеющим смысл высоты классического элек-

тродного слоя, а параметр $\tau = (q_\infty \alpha)^{-1/2}$ есть время электрической релаксации. Оценим значения параметров τ и L_{nE} . В случае $E_0 = -100 \text{ B/m}$ получаем $\tau \approx 300 \text{ с}$ ($q_\infty = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \text{ с}$) и $L_{nE} \approx 4,2 \text{ м}$ ($E_\infty = -100 \text{ B/m}$, $b_{1,2} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ B}^{-1} \text{ с}^{-1}$).

Таким образом характерная высота классического электродного слоя составляет 4-5 м, а время установления стационарного состояния - примерно 5 мин [5].

IV. ПРИБЛИЖЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ЭФФЕКТА

При условии $\xi_{1,2} < 1$ имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm b_{1,2} \frac{\partial(E \cdot n_{1,2})}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) &= q(z) - \alpha n_1 n_2, \\ \frac{\partial E}{\partial z} &= \frac{e}{\varepsilon_0} (n_1 - n_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Введем обозначения (2) и получим следующие безразмерные уравнения:

$$\tau \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t} \pm \tau b_1 E_\infty \frac{\partial(n'_{1,2} E')}{\partial z'} - D_1 \tau \frac{\partial}{\partial z'} \left(z' \frac{\partial n'_1}{\partial z'} \right) = 1 + \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2. \quad (8)$$

В уравнениях (8) можно выделить ряд параметров: $L_{nE1} = b_1 E_\infty \tau$, $L_{nE2} = b_2 E_\infty \tau$, $L_D = D_1 \tau$, $\tau = (q\alpha)^{-1/2}$, определяющих пространственные и временной масштабы процессов. При значениях параметров $D_1 = 0,1 \text{ м/с}$, $E_\infty = -100 \text{ B/m}$ и $\tau \approx 300 \text{ с}$, получаем значения: $L_{nE1} = 3,6 \text{ м}$ ($b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ B}^{-1} \text{ с}^{-1}$) и $L_{nE2} = 4,2 \text{ м}$ ($b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ B}^{-1} \text{ с}^{-1}$), как и в классическом случае, а турбулентный перенос дает масштаб $L_D = 30 \text{ м}$.

Таким образом в турбулентном электродном слое появился дополнительный пространственный масштаб, превышающий на порядок масштаб в нетурбулентном случае. Характерное время установления стационарного состояния не изменилось [5].

V. ПРИБЛИЖЕНИЕ СИЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

В этом случае система (1) расщепляется по малому параметру ($\xi_{1,2} < 1$) на два уравнения первое из которых описывает распределение аэроионов (и, следовательно, электрической проводимости λ) под действием только турбулентного переноса, а решением другого является профиль электрического поля с учетом рассчитанных значений проводимости [1, 2]. В стационарном виде система имеет вид:

$$\begin{aligned} -\frac{d}{dz} \left(D_T(z) \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) &= q - \alpha n_1 n_2, \\ -D_T(z) \frac{d^2 E}{dz^2} + \lambda(z) E &= j_0 / \varepsilon_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где j_0 – плотность электрического тока. Характерный масштаб турбулентного электродного слоя $L_m = (\varepsilon_0 D_m / \lambda_\infty)^{1/(2-m)}$ зависит от параметра стратификации (m) приземного слоя [1].

Таким образом в случае сильно развитого турбулентного перемешивания характерный пространственный масштаб для электродинамических параметров приземного слоя может достигать 100 м [1, 2].

VI. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Для моделирования поведения электрического поля в приземном слое атмосферы преобразуем систему (7). Используя уравнение Пуассона, после интегрирования из системы (7) получаем уравнение для плотности полного электрического тока (j) в приземном слое атмосферы:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \lambda E - D_T(z, t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = j(t) / \varepsilon_0. \quad (10)$$

Вариации плотности электрического тока $j(t)$ вблизи поверхности земли определяются нестационарностью электрических полей выше приземного слоя, т.е. обуславливаются глобальными изменениями потенциала ионосферы, вызываемыми грозовыми токовыми генераторами и другими генераторами, действующими в верхних слоях атмосферы [7, 8].

Локальные вариации электрических характеристик приземного слоя, сопоставимые с глобальной унитарной вариацией, даже в условиях «хорошей погоды» могут быть вызваны метеорологическими факторами, прежде всего изменениями коэффициента турбулентной диффузии [2, 5]. В квазистационарном приближении установлено, что временной ход коэффициента турбулентной диффузии значительно влияет на распределение аэроионов, объемного заряда и электрического поля на высотах до одного метра. Расчеты с учетом экспериментальных данных в особо чистых высокогорных условиях [2, 9] показывают возможность возникновение дополнительного дневного максимума в суточном ходе электрического поля вследствие суточной вариации коэффициента турбулентной диффузии.

Далее, рассмотрим задачу о вариации электрического поля в приземном слое вследствие глобальных изменений плотности электрического тока. Будем предполагать: $\lambda = \text{const}$ и $D_T = D_0 = \text{const}$. Последнее допущение соответствует условиям устойчивой стратификации приземного слоя атмосферы. Общий вид граничных и начальных условий для уравнения (10), с соответствующей левой частью, может быть представлен следующим образом:

$$\begin{aligned} E|_{z \rightarrow 0} &= E_0 = j_0 / \lambda, \quad E|_{t=0} = E(0, z), \\ \left. \left(\frac{\partial E}{\partial t} + \lambda E \right) \right|_{z \rightarrow \infty} &= j_o(t) / \varepsilon_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Зададим закон глобального суточного изменения тока в течение суток в виде гармонической функции:

$$j(t) = j_0(1 - \alpha \sin(\omega t)), \quad \omega = 2\pi/T. \quad (12)$$

При значениях параметров $\alpha = 0,2$ и $T=24$ ч функция суточного изменения электрического тока имеет вид волны с минимумом в 06^h UT и максимумом в 18^h UT и амплитудой 20% (отклонения от среднего значения), что достаточно хорошо согласуется с унитарной вариацией [3,4].

Рассмотрим несколько частных случаев.

a) Рассмотрим последнее граничное условие в (11) как самостоятельное уравнение, описывающее вариации электрического поля на верхней границе электродного слоя ($z \rightarrow \infty$) вследствие изменений глобального тока.

$$\frac{dE}{dt} + \lambda E = j(t)/\varepsilon_0, \quad (13)$$

Зададим гармонический закон изменения тока в течение суток в виде функции (12). Тогда решением уравнения (12) при начальном условии (11) с учетом оценки значений параметров (пренебрегая малыми слагаемыми) [9, 10] получаем следующее уравнение:

$$E(t) = \frac{j_0}{\lambda}(1 - \alpha \sin(\omega t)), \quad (14)$$

т.е. закон изменения электрического поля во времени на верхней границе электродного слоя полностью совпадает с заданной глобальной вариацией электрического тока. Полученный результат соответствует предельному случаю, когда электродный эффект у поверхности земли отсутствует.

б) Наличие электродного слоя означает, что значения электрической проводимости воздуха зависят от высоты [9, 10]. Тогда, предполагая профиль электрической проводимости равным:

$$\lambda = \lambda_0 \exp(z/l_0), \quad (15)$$

где l_0 – характерная толщина классического электродного слоя, получаем пространственно-временное распределение электрического поля в виде:

$$E(z; t) = \frac{E_0}{e^{z/l_0}} \cdot (1 - \alpha \sin(\omega t)), \quad E_0 = j_0 / \lambda_0. \quad (16)$$

Колебания электрического поля и тока совпадают по времени, но различаются по амплитудным значениям. С увеличением высоты над поверхностью земли значения амплитуды возмущения электрического поля уменьшаются, а при увеличении толщины l_0 электродного слоя увеличиваются.

в) Вернемся к задаче (10) о пространственно-временном распределении электрического поля $E(z, t)$ в турбулентном приземном слое вследствие вариации плотности электрического тока на его верхней границе. В результате расчетов методом Фурье [10, 11] получено, что в суточном ходе электрического поля с

увеличением значений коэффициента турбулентной диффузии происходит запаздывания по времени (на 2–3 ч) в наступлении утреннего минимума и вечернего максимума. Также наблюдается рост абсолютных величин амплитудных значений напряженности электрического поля относительно среднего значения от 20% до 40%, что показывает изменения пространственно-временного распределения электрического поля в условиях турбулентного электродного эффекта. Для больших значений коэффициента турбулентности возмущения электрического поля существенно превышают (на 35–40%), значения унитарной вариации.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Представленный анализ математической моделей электродинамики приземного слоя атмосферы может быть полезен для решения прикладных задач. Электродинамическое состояние приземного слоя атмосферы определяется электродным эффектом, а нестационарные электрические процессы вблизи поверхности земли обусловлены совместным действием, как глобальных возмущений вне приземного слоя, так и действием локальных генераторов в нем.

Проведённое математическое моделирование унитарной вариации позволяет сделать вывод о влиянии электродного эффекта не только на пространственные, но и временные характеристики электрического поля в турбулентном приземном слое. В турбулентном электродном слое появляется сдвиг по времени на несколько часов минимума и максимума в суточном ходе электрического поля вблизи поверхности земли относительно изменений полного тока. При усилении турбулентного перемешивания это смещение усиливается и происходит рост амплитудных значений вариаций электрического поля. Увеличение напряжённости электрического поля немногого уменьшает смещение максимума вследствие усиления влияния классического электродного эффекта, который препятствует воздействию турбулентности. Для более точного соответствия модельных расчетов результатам экспериментальных исследований необходимо использовать более сложное представление для коэффициента турбулентного перемешивания, зависящее от времени и высоты.

Следует отметить, что радиоактивное и аэрозольное загрязнения атмосферы также оказывают влияние на пространственно-временные распределения ее электродинамических характеристик, но этот вопрос выходит за рамки настоящего доклада.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 506 с. – ISBN:5-286-00245-5
2. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог. Изд-во ТРТУ, 1998. – 123 с. – ISBN: 5-8327-0009-0.
3. Harrison R.G. The Carnegie curve. Surveys in Geophysics. – 2013. – 34 (2). – P. 209–232. – DOI 10.1007/s10712-012-9210-2.

4. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений // ДАН. Геофизика. – 2015. – Т. 462, № 2. – С. 213-216. – DOI: 10.7868/S0869565215080174.
5. Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 114 с. – ISBN: 978-5-8327-0311-4.
6. Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // Известия вузов. Радиофизика. – 2013. – № 11-12. – Т. 56. – С. 820-828. – ISSN: 0021-3462.
7. Морозов В.Н. Модель нестационарного электрического поля в нижней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т.45, № 2. – С. 268-278. – ISSN: 0016-7940.
8. Williams E.R., Mareev E.A. Recent progress on the global electrical circuit // Atmos. Res. – 2014. – Vol. 135-136. – P. 208-227. – DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.05.015.
9. Kuprovkh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A.G. Modeling of the atmospheric electric field local variations in the turbulent surface layer // Journal of Physics: IOP Conference Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity. 1604 (2020) 012003. – 5 p. – DOI: 10.1088/1742-6596/1604/1/012003.
10. 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. – DOI: 10.31857/S0002351521040027.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – СПб.: Изд-во «Лань», 2003. – 831 с. – ISBN: 5-8114-0485-9.

Повторное использование моделей при моделировании систем

Буренко Антон Александрович

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

Поленов Максим Юрьевич

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

Пуховский Валерий Николаевич

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

Аннотация. В работе рассматриваются актуальные подходы к конвертации и повторному использованию моделей, а также созданные и развивающиеся инструментальные программные средства в данной области. Помимо этого, рассмотрены особенности модельно-ориентированного проектирования и решения задач трансляции внешних моделей, проведен анализ подходов и рассмотрена актуальность представленных разработок при моделировании современных сложных технических систем.

Annotation. The paper discusses current approaches to the conversion and reuse of models, and also created and developed software tools in this area. In addition, the features of model-based design and the solution of problems of external models translation are considered, the analysis of approaches is carried out and the relevance of the presented developments in the modeling of modern complex technical systems is considered.

Ключевые слова: моделирование сложных систем, модельно-ориентированное проектирование, трансляция моделей, Мультиранслятор, автоматизация трансляции, экспертная система.

Keywords: complex technical system simulation, model-based design, models translation, Multitranslator, translation automation, expert system.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит стремительное развитие информационных технологий, причем как в аппаратной, так и в программной областях. Достигнуты значительные успехи в оптимизации используемых ресурсов и работе с данными. Совершенствование данных технологий открывает новые горизонты для развития моделирования, а также разработки и поддержки инструментальных средств проектирования сложных систем. При этом усилия разработчиков и исследователей направлены как на проектирование новых систем, так и на поиски способов эффективного использования уже имеющихся решений и моделей в новых технологиях и средах.

В современных условиях при достаточно большом числе программных средств моделирования и проектирования возникает необходимость в возможности сохранения и повторного использования ранее разработанных

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-07-00936).

и отлаженных моделей сложных систем и их компонент. Тем самым становятся актуальными задачи трансляции (конвертации) моделей для их дальнейшего применения исследователями в выбранных инструментальных средствах [1]. Тем не менее, процесс трансляции существующих моделей в требуемый формат предполагает значительные временные затраты, в том числе на изучение нового средства моделирования, языка и формата представления моделей. Эту проблему можно решить посредством разработки инструментальных средств трансляции (конвертации) моделей между исходной и целевой средами моделирования. При наличии таких средств от пользователей требуется только выдача формального описания формата целевой модели, а от разработчиков – создание программных модулей, использующих уже разработанный механизм универсальной трансляции.

Подобный подход позволил бы значительно сократить временные затраты, как на внедрение нового продукта в уже существующую базу моделей, так и на освоение пользователями новой среды.

II. РАЗВИТИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ТРАНСЛЯЦИИ

Современным подходом к проектированию систем управления и обработки данных является модельно-ориентированное проектирование (МОП), представляющее собой совокупность математических и визуальных методов и программных средств для решения широкого круга задач [2].

В модельно-ориентированном проектировании систем управления разработку принято подразделять на четыре этапа:

- Построение модели объекта управления.
- Анализ и построение регулятора.
- Моделирование объекта и системы управления.
- Реализация системы управления на объекте.

Принципы МОП существенно отличаются от традиционной методологии проектирования. Разработчики могут применять модельно-ориентированное проектирование для улучшения характеристик модели, используя стандартные функциональные блоки. Построенные таким образом модели, при условии их использования вместе с инструментами моделирования, позволяют быстро достичь результата в создании прототипа системы управления,

тестировании и верификации программного обеспечения. В некоторых случаях аппаратно-программное моделирование может быть использовано в качестве инструмента проектирования для более быстрого и эффективного тестирования динамических воздействий на систему, в отличие от традиционного метода проектирования.

Применение методов МОП, в сравнении с традиционными подходами, дает исследователю следующие преимущества:

- Модельно-ориентированное проектирование предоставляет общую среду разработки, обеспечивая активное взаимодействие разработчиков в процессе анализа данных и проверки системы.
- Появляется возможность найти и исправить ошибки на ранних стадиях проектирования системы, что минимизирует время затрачиваемое на разработку.
- Модельно-ориентированное проектирование поддерживает повторное использование моделей для сокращения времени моделирования и создания технических систем с расширенными возможностями.

Повторное использование моделей основано на возможности их конвертации в необходимый формат.

Работы в области конвертации программ с одного языка на другой ведутся уже давно, однако, несмотря на многочисленные попытки, удачное решение долгое время не удавалось найти. Даже в случае трансляторов между относительно простыми языками с весьма простыми библиотеками, например, с языка C на Pascal и с Pascal на C, выходные данные долгое время не были представлены на достаточном уровне. Принципы функционирования и правила языков программирования бывают различны, и создать транслятор считалось возможным лишь над подобными языками, правила синтаксиса и строения которых можно интерпретировать в общий язык. Для языков же, в которых отличается типизация примитивов и количество их видов, разработка сталкивалась со значительными сложностями. А при переходе от кода к моделям возникают и другие проблемы конвертации, поскольку стандартная интерпретация кода из одного языка в другой не позволяет получить идентичный виртуальный образ модели, работающий без ошибок.

Однако в работе с моделями были достигнуты и определенные успехи, во многом благодаря использованию таких подходов, как, например, мультимодельный [3]. В данном случае декомпозиция моделей, т.е. замена сложных моделей более простыми, позволяет снизить использование вычислительных ресурсов, при этом не теряя в результативности. Соответствующий инструментарий позволил проводить анализ моделей, упрощенных благодаря применению данного подхода, и далее сравнивать и подтверждать результаты анализа. С дальнейшим развитием моделирования инструменты продолжали совершенствоваться; упор был сделан в том числе на процессы информационного обеспечения.

Также стоит отметить, что вопрос трансляции носит интернациональный характер и становится актуальным во всем мире в одно время с широким распространением языков программирования. Многие приложения из-

начально включали модули на разных языках, и основной проблемой была их непосредственная интеграция [4]. Проводя анализ отечественных и зарубежных статей, можно заметить, что и в тех и в других велась разработка новых модулей, расширяющих функционал используемых решений. Для успешной интеграции программистам было необходимо обозначать «чужие» сущности, такие как объекты и подпрограммы, а также связанные с ними типы. Для корректной трансляции требовалось значительные исправления неточностей и неопределенностей.

Одним из подходов, применяющихся для решения задачи трансляции за рубежом, является написание и использование специализированных фреймворков. Такие фреймворки, как JOSI [5], направлены на упрощение разработки: представленные способы представления семантической информации и реализации моделей могут легко использовать разработчики, не имеющие глубоких знаний касательно семантических моделей и языков. JOSI позволяет представлять модели предметной области через интерфейсы Java и аннотации, а затем использовать такое представление для автоматической генерации реализации моделей предметной области на различных языках программирования (таких, как Java и C++). Кроме того, JOSI поддерживает взаимодействие с другими приложениями, как с помощью автоматического отображения представлений модели предметной области в онтологии, так и обеспечения автоматической трансляции каждого объекта, полученного из представлений модели предметной области, в строковое представление языка OWL. Такой подход обладает значительным потенциалом благодаря своей простоте и популярности фреймворков в современных разработках.

Изучая проблему существования большого количества сложных алгоритмов или моделей, представленных в форматах, не поддерживающих современными системами, или же недоступными для интерпретации используемой системой, российские ученые пришли к идеи «многоплатформенного транслятора» [6], транслирующей подсистемы, способной обеспечить перевод модели или алгоритма на язык промежуточного представления. Такой транслятор использует многопроцессорную поддержку и написан на языке высокого уровня. В результате появилась подсистема, интерпретирующая модели из выбранного подмножества языков моделирования, используемого исследователями. Любая модель имеет одинаковое представление для используемого транслятором языка, и модели из данных форматов всегда могут быть проинтерпретированы в новые другие языки, при условии, что они относятся к допустимому подмножеству или обладают преемственностью по формату представления.

Следующая разработка была основана на структурно-процедурном способе моделирования [7]. Подготовка задачи для моделирования осуществляется при помощи персонального компьютера, поскольку основным требованием была реализация удобного и многофункционального интерфейса программирования. Решение самой задачи моделирования производится полностью на многопроцессорной высокопроизводительной вычислительной структуре, которая позволяет получить решение при минимальных временных затратах, расширить функциональность и повысить производительность всей системы для конкретного класса задач.

Результатом дальнейшей работы стало появление программной среды многоязыковой трансляции, названной Мультитранслятором (МТ) [8]. Основой процесса конвертации моделей является трансляционный модуль (ТМ) Мультитранслятора, представляющий собой набор правил описания грамматик исходного языка моделирования на языке описания грамматик, и генерации выходного кода моделей действий преобразования на языке описания действий [9]. Мультитранслятор функционирует как среда разработки трансляционных модулей, а также как среда конвертации моделей, использующая уже разработанные ТМ. При разработке трансляционных модулей необходимы как знания самой среды, входного и выходного языков описания моделей [10], так и языков описания трансляционного модуля Мультитранслятора. В систему трансляции должны быть изначально заложены требования к ТМ, чтобы обеспечить возможность расширения транслируемых форматов [11].

Алгоритм работы ядра МТ основан на стратегии полного перебора на дереве вывода, создаваемом по методу поиска в глубину с возвращениями для поиска альтернативных ветвей. Основными преимуществами этого метода разбора являются универсальность, минимальное количество ограничений на способ описания грамматик, а также доступный для понимания пользователя алгоритм работы. Главный недостаток метода заключался в его низкой скорости, однако позднее были разработаны дополнительные алгоритмы оптимизации, позволившие значительно ускорить анализ [9]. Об этих разработках будет рассказано далее.

Основные этапы разработки трансляционного модуля в среде «Мультитранслятор» [12] включают:

- Описание главной процедуры.
- Определение грамматики языка описания исходных моделей при помощи продукционных правил.
- Описание действий по генерации выходного кода в этих правилах.

Трансляционный модуль состоит из:

- Описания глобальных объектов данных.
- Набора продукционных правил.
- Описания процедур и функций, используемых в продукционных правилах и главной процедуре модуля.
- Главной процедуры main().

Описание главной процедуры модуля является основным блоком кода, в котором выполняется подготовка данных и файлов и описываются правила разбора. Именно из этой процедуры и выполняется грамматический разбор. Главная процедура носит имя main, которое зарезервировано в языке описания действий (ЯОД) – одним из двух языков Мультитранслятора [11].

Далее рассмотрим использование разработанных инструментальных средств при трансляции моделей для отечественной среды SimInTech.

III. ТРАНСЛЯЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СРЕДЫ SIMINTECH

Среди средств моделирования сложных технических систем выделяется среда SimInTech [13]. Комплекс SimInTech используется для исследования динамических процессов в технических системах, функционирование которых может описываться с помощью систем дифференциально-алгебраических уравнений, или же методами структурного моделирования. Данная разработка способна конкурировать с такими средствами, как MATLAB Simulink, MATRIX, VisSim, SimulationX, имея очень мало аналогов на отечественном рынке.

В среде SimInTech язык программирования по синтаксической структуре напоминает язык Pascal и применяется для создания скриптов для блоков моделей или разработки собственной модели с помощью блока «Язык программирования» (рис. 1), часть возможностей также позаимствована из языка Си.

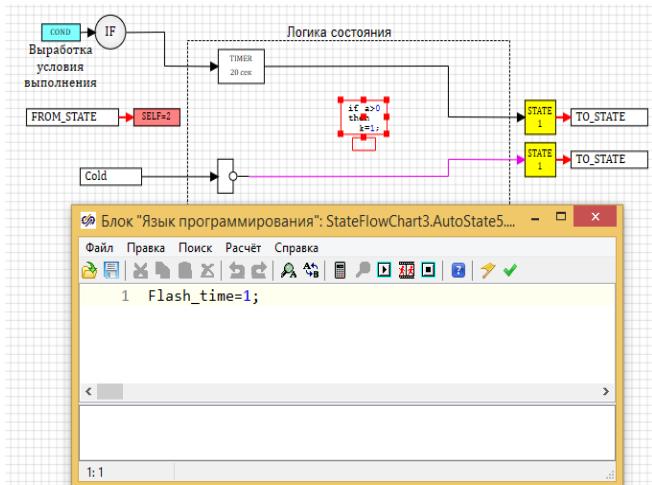


Рис. 1. Работа блока «Язык программирования» среды SimInTech

В языке SimInTech, подобно многим другим языкам программирования, требуется объявить объект кода перед его использованием. Программа обрабатывает поступающую информацию и имеет несколько этапов: получение информации (ввод данных), работа с информацией (обработка данных), вывод информации (отображение результатов) [11]. Следование порядку этапов обязательно.

Помимо упомянутого выше блока «Язык программирования», в меню «Параметры» можно описывать переменные и параметры [13]. Такая возможность позволяет работать с объектами схемы в процессе выполнения программы. Панель «Параметры» имеется у каждого уровня комплексной модели, что позволяет создавать скрипты для каждого уровня отдельно.

Программа состоит из деклараций и операторов. Декларации начинаются с ключевых слов и инициализируют соответствующие переменные и константы. Декларацию допускается размещать не только в начале программы. Она обязательно должна иметь объявление входных, выходных и динамических переменных. Все переменные и константы могут быть применены только после их объявления в декларации. Также возможно не задавать тип функции и типы её параметров. В таком случае функции

будет присвоен такой же тип, как и результату выходного выражения функции, а типы параметров присваются в момент передачи данных этим параметрам.

В SimInTech имеется возможность создания пользовательских библиотек. Вызов библиотек внутри программы осуществляется с применением ключевого слова «`<include>`».

Для снижения затрат на внедрение новых сред разработки и минимизации ошибок разработчикам требуются инструменты, которые будут осуществлять трансляцию как полной модели, так и её отдельных частей. Одним из таких инструментов способна успешно выступать подсистема трансляции моделей на базе комплекса многоязыковой трансляции Мультитранслятор, позволяющая объединить все возможные отдельные модули трансляции.

Рассмотрим работу главной процедуры `main` на примере трансляционного модуля конвертации моделей [14] с языка Си в формат среды моделирования SimInTech [15]. Сперва выполняется функция `ParamCount` для определения количества введенных параметров. В результате анализа разделителей в языке Си видно, что слова могут разделяться пробелами, переводом строки или специальным символом. Следовательно, параметр `SolitaryWords`, служащий для обработки разделителей при интерпретации лексем, необходимо переключить в активное состояние. Так как язык программирования Си не учитывает количество пробелов между словами, то включается также и `IgnoreWhiteSpaces`. В параметре `Delimiters` указывается список всех разделителей, допустимых в файле исходной модели.

Далее необходимо указать конструкции и символы, которые среда Мультитранслятор будет игнорировать в процессе работы, с помощью `IgnoreBlock`. Поскольку программы на Си не чувствительны к определению регистра, устанавливается параметр `IgnoreCase`.

Функция `Parse` запускает грамматический разбор и начинает обработку лексем с правила, указанного в параметре данной функции. В конце разбора вызывается функция `SaveAllFiles()`, которая сохраняет полученные результаты в файл.

На следующем этапе необходимо описать действия, генерирующие код в выходном формате, в данном случае в формате языка среды SimInTech. Это реализуется при помощи операторов и функций языка описания действий Мультитранслятора [9, 11].

Конструкции исходного языка переписываются в аналогичные для языка среды SimInTech. К данным конструкциям, например, следует отнести фигурные скобки языка Си, которые соответствуют ключевым словам `begin` и `end`.

После формирования действий для генерации выходного кода синтез трансляционного модуля завершается и его можно использовать при конвертации моделей.

IV. ДРУГИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СРЕДЫ ТРАНСЛЯЦИИ МОДЕЛЕЙ

В результате многолетней работы в Мультитранслятор были внесены и другие улучшения и дополнения. Например, было реализовано взаимодействие с пользователем в процессе трансляции исходной модели с целью решения возникающих неопределенностей. Дело в

том, что при генерации моделей на выходном языке в ряде случаев требуется доопределение некоторых параметров модели, которые не могут быть автоматически сопоставлены определенным конструкциям входного языка. Для этих целей использовалась автоматизированная процедура формирования запросов к пользователю и обработки полученных от него параметров. Это было воплощено в виде программного модуля, названного «Мастер генерации моделей» [16].

В процессе работы с Мультитранслятором и развития данного подхода была разработана версия МТ в виде клиент-серверного приложения на основе архитектуры распределенных систем. В данной версии МТ размещался на стороне сервера для трансляции моделей удаленных клиентов, выполняя тем самым распределенную реализацию подхода к повторному использованию моделей. Была реализована распределенная библиотека моделей, что значительно упростило совместный доступ исследователей к исходным и полученным моделям. В этой библиотеке на стороне исследователя-клиента используется пользовательский интерфейс по подключению к серверу, выбору трансляционного модуля для конвертации, выбору исходных моделей из локального или серверного хранилища, а также по завершению процедуры трансляции и доступу к коду конвертированной модели на выходном языке для целевой среды моделирования.

Производительность средств виртуального моделирования сложных систем стало возможно увеличить с помощью включения в их архитектуру многопроцессорных акселераторов, и организации процедурно-структурных вычислений на их основе. Эффективная реализация этого подхода требовала трансляции исполняемых программ единым инструментарием, с ролью которого успешно справился Мультитранслятор, поскольку его ядро не зависит от входных алгоритмических языков. В качестве акселератора была разработана многопроцессорная система структурного моделирования на базе сигнальных процессоров [9].

Далее рассматриваемый подход развивался в направлении автоматизации трансляции и разрешения исключительных случаев, возникающих при трансляции моделей, вызванных недостаточностью входных данных или неопределенностью решений по конвертации моделей, возникающей при наличии слишком большого числа исходов при разборе. С решением данных задач помогло справиться использование экспертной системы (ЭС). При ее построении главным является реализация базы знаний, в основу которой была положена продукционная модель знаний. Ключевым процессом синтеза необходимых знаний для базы знаний является инжиниринг знаний, представляющий собой разработку систем, основанных на знаниях конкретной отрасли [17]. Он, в общем виде, состоит из определения и выбора источника знаний с последующим их приобретением, анализом и извлечением [18]. Перед непосредственно сбором знаний необходимо сформировать требования к получаемым знаниям; в этот этап входит определение источников знаний, оценка их важности, доступности, и, наконец, выбор источников для их использования в ходе разработки.

В качестве основного источника использовались трансляционные модули Мультитранслятора. Поскольку трансляционный модуль агрегирует все знания, которые

использует МТ в ходе процесса трансляции моделей, то, декомпозировав его, можно заложить фундамент базы знаний [19]. На следующих этапах рассматривалась техническая документация исходного языка описания моделей и выходного языка, на котором генерируется результат трансляции, затем основные публикации по расширенному описанию этой документации с практическими примерами, и наконец, завершающим этапом является получение знаний от экспертов.

Как итог, была обеспечена интеллектуальная поддержка трансляции моделей и их повторное использование. Полученные результаты позволили расширить функциональные возможности распределенной библиотеки моделей при трансляции внешних моделей за счет использования экспертной системы и эффективной обработки неопределенностей, возникающих в процессе трансляции. Это позволило сократить временные затраты на конвертацию внешних моделей при моделировании сложных систем.

Данные разработки находят значимое практическое применение. Например, интеллектуальная поддержка многоязыковой трансляции оказалась востребованной при моделировании мобильных роботизированных платформ [20]. Многие из этих платформ моделируются и исследуются на основе Robot operation system (ROS), использующей языки C++ и Python для описания моделей. Структура модели в ROS может быть представлена в виде нескольких узлов, соединенных между собой в граф. Узлы передают друг другу сообщения, используя потоковую передачу посредством сетевых протоколов (TCP, UDP), RPC-сервисов и сервера параметров. В общем случае узел – это процесс, который производит вычисления, но он также может быть представлен как модель. ROS позволяет использовать при моделировании мобильных роботизированных платформ модульную архитектуру с помощью механизма независимых узлов. На выходе узла происходит публикация данных в специальном формате.

Имеется обширная база моделей для таких сред, как MATLAB и Octave, однако применение многоязыковой трансляции позволит использовать эти модели, не создавая их заново, позволяя сократить время моделирования. Для применения трансляции моделей с интеллектуальной поддержкой потребуется трансляционный модуль (ТМ) Мультитранслятора, который позволит перевести MATLAB-модели в модели на C++ с учетом формата описания узлов в системе ROS. Также необходима еще одна, соответствующая настроенная база знаний для экспертной системы [21]. Экспертная система позволит автоматизировать процесс трансляции моделей путем обработки исключительных случаев и неопределенностей данных.

Таким образом, необходимость обращаться за помощью к эксперту языка моделирования можно избежать с помощью представленного решения. Мультитранслятор и распределенная библиотека моделей успешно используются для трансляции моделей узлов и их интеграции в систему моделирования мобильных роботизированных платформ, что позволяет ускорить и упростить разработку таких систем. Это снова доказывает универсальность рассматриваемого подхода и состоятельность МТ как средства трансляции с широкой функциональностью.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация предложенного подхода к обеспечению повторного использования моделей была рассмотрена на примере трансляционного модуля для перевода моделей из языка Си в язык среды модельно-ориентированного проектирования SimInTech. Результаты работы исходных и оттранслированных моделей совпадают, что позволяет сделать вывод об успешной работе комплекса Мультитранслятор в направлении конвертации моделей. Представленная система способна работать с трансляционным модулем, отвечающим заданным требованиям, позволяя решить проблему совместимости различных библиотек.

Рассмотренные разработки позволяют выполнять задачи конвертации моделей в целевые форматы, учитывая и сохраняя особенности формализованного представления моделей в различных средах моделирования, в то же время значительно сокращая время разработки необходимых трансляционных модулей для выбранных направлений конвертации. Данный подход также позволяет расширить возможности повторного использования ранее разработанных моделей в целевых средах моделирования.

Предложенные принципы организации конвертирования кодов моделей позволяют эффективно модернизировать разработанные инструментальные средства, а также дополнять или изменять трансляционные модули.

Разработки в области многоязыковой трансляции моделей являются востребованными и актуальными для применения в современных системах модельно-ориентированного проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Robinson S., Nance R.E., Paul R.J., et al. Simulation model reuse: definitions, benefits and obstacle // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2004. – Vol. 12. – P. 479-494.
2. Модельно-ориентированное проектирование. Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Модельно-ориентированное_проектирование (дата обращения: 22.06.2021).
3. Gelovani V.A., Britkov V.B., Yurchenko V.V. An interactive modeling system for analysis of alternative decisions // Decision Support Systems: Issues and Challenges / IIASA proceedings series. – Oxford: Pergamon Press, 1980. – P. 149-151.
4. Gingell M., Comar C., Hainque O. Multi-language programming: The challenge and promise of class-level interfacing // Proceedings of the GCC Developers' Summit, 2006. – P. 59-74.
5. Poggi A., Tomaioulo M. Multilanguage Semantic Interoperability in Distributed Applications // Journal of Engineering (United Kingdom). – 2013. – Vol. 2013. – P. 1-9. – DOI 10.1155/2013/182525.
6. Гузик В.Ф., Чернухин Ю.В., Самарин М.А., Мунтян О.А. Принципы построения универсального транслятора продукционного типа // Методы кибернетики и информационные технологии: Сборник научных трудов. Вып. 3 – Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 1999. – С.20-28.
7. Гузик В.Ф., Золотовский В.Е., Чернухин Ю.В. Структурное моделирование силовых электрических систем // Известия ТРТУ. – 2001. – № 1. – С. 25-32.
8. Чернухин Ю.В., Поленов М.Ю. Инструментальная подсистема многоязыковой трансляции виртуальных моделирующих систем // Известия ТРТУ. – 2004. – № 3. – С. 115-120.
9. Чернухин Ю.В., Гузик В.Ф., Поленов М.Ю. Многоязыковая трансляция средств виртуального моделирования. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 368 с. – ISBN 978-5-902982-63-0.
10. Chernukhin Yu., Guzik V., Polenov M. Multilanguage Translation Usage in Toolkit of Modeling Systems // WIT Transactions on Information and Communication Technologies. – 2014. – Vol. 58. – P. 397-404. – DOI 10.2495/ICTE130491.

11. Поленов М.Ю., Пуховский В.Н., Маслаков А.А. Программная трансляция моделей для систем моделирования // Информатизация и связь. – 2018. – № 4. – С. 25-30.
12. Маслаков А.А., Поленов М.Ю. Синтез программного модуля трансляции моделей // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАиУ-2016): Сборник трудов XIV Всероссийской научной конференции. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 2. – С. 315-318.
13. SimInTech, среда динамического моделирования. – URL: <http://simintech.ru> (дата обращения: 22.06.2021).
14. Маслаков А.А., Поленов М.Ю. Программный модуль трансляции моделей для среды SimInTech // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности / Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. – Ч. 2. – С. 366-370.
15. SimInTech Simulation Environment Help System. – URL: http://simintech.ru/webhelp/#o_simintech/o_simintech.htm (дата обращения: 22.06.2021).
16. Чернухин Ю.В., Поленов М.Ю., Писаренко С.Н. Особенности использования мастера генерации моделей при мультитрансляции // Известия ТПТУ. – 2006. – № 9-1. – С.88-89.
17. Kendal S., Creen M. An introduction to knowledge engineering. – Springer, 2007. – 286 p. – ISBN 978-1-84628-667-4.
18. Gonzalez A.J., Dankel D.D. The Engineering of Knowledge-based Systems: Theory and Practice. – Prentice-Hall, 2000. – 523 p. – ISBN 978-0132769402.
19. Поленов М.Ю., Курмалеев А.О. Использование инжиниринга знаний для интеллектуальной поддержки трансляции моделей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 123-130. – DOI: 10.18522/2311-3103-2020-5-123-130.
20. Поленов М.Ю., Пуховский В.Н., Курмалеев А.О. Организация трансляции моделей при моделировании мобильных роботизированных платформ // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017.– № 6-2. – С. 184-190.
21. Polenov M., Gushanskiy S., Kurmaleev A. Synthesis of Expert System for the Distributed Storage of Models // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2017. – Vol. 575. – P.220-228. – DOI 10.1007/978-3-319-57141-6_23.

Динамика конечности паукообразного робота

Щербаков Максим Игоревич
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
msherbakov@sedu.ru

Аннотация. В данной статье проведен анализ работ в области шагающих мобильных роботов, который показывает, что вопрос о математическом описании динамики шагающих роботов остается открытым. В данной работе приведены этапы получения математического описания динамики конечности шестиногого шагающего робота. Также приведены результаты моделирования динамики конечности робота и приведены этапы синтеза системы управления на основе полученной математической модели.

Annotation. The paper contains analysis of the works in the sphere of legged mobile robots. The analysis shows the lack of investigation in the field of legged robot dynamics description. In the work stages of obtaining robot leg dynamics model are presented. Also, the paper provides the results of robot leg modeling and the results of control system synthesis based on the obtained model.

Ключевые слова: Шестиногий шагающий робот, динамическая модель, обратная задача кинематики, шагающий робот, мобильный робот.

Keywords: Six-legged robot, dynamics model, inverse kinematics, legged robot, mobile robot.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире роботы используются повсеместно: как в сфере военных технологий, так и в повседневной жизни. Они выносливей человека и способны выполнять работу более точно и аккуратно. Кроме того, роботы могут успешно использоваться для работы в экстремальных условиях. Для выполнение таких операций роботы должны являться автономными либо полуавтономными мобильными роботами. Большинство мобильных роботов являются гусеничными или колесными. Однако существует такой вид мобильных роботов, как шагающие мобильные роботы. Они способны функционировать на поверхностях, недоступных гусеничным либо колесным роботам. Такое преимущество данному виду роботов дает прежде всего принцип их передвижения – перемещения опорных конструкций, функционально схожих с конечностями живых существ. Такое передвижение не требует наличие непрерывной поверхности опоры [1–3].

Однако несмотря на преимущества в проходимости, шагающие мобильные роботы на сегодняшний день уступают в эффективности гусеничным и колесным роботам [4–6]. Это вызвано сложностью синтеза систем управления данными роботами и отсутствием эффективного метода актуирования их сочленений [3]. Стоит от-

метить о существовании также гибридных видов мобильных роботов, таких как шагающие гусеничные и шагающие колесные мобильные роботы [4, 5].

На сегодняшний день к вопросам управления шагающими роботами привовано внимание многих исследователей. Разработка шагающих роботов разными группами инженеров ведется с 1968. Так первый функционирующий шагающий робот был разработан компанией General Electrics. Он имел четыре конечности, приводимые в движения гидравлическими приводами, при этом имел массу 1300 кг и развивал скорость в 8 км/ч. В 1985 был спроектирован первый шестиногий шагающий робот VAS. В этом же году в советском союзе был сконструирован шагающий робот на электроприводах НМПА Manned Hexapod Rover [6].

Сегодня активный вклад в изучения шагающих роботов вносит компания Boston Dynamics. Данная компания уже представила миру успешные проекты шагающих роботов: квадропед BigDog [7–9], двуногий шагающий робот Atlas и многие другие разработки.

Одним из открытых вопросов в области шагающих роботов сегодня является математическое описание конечностей таких роботов [2, 3]. Многие исследователи не берут во внимание динамику звеньев и сочленений конечности шагающего робота [1, 4, 5, 7, 10], а используют для управления лишь решение обратной задачи кинематики. Если же динамика конечности учитывается, то во многих случаях применяется упрощенная модель динамики [2, 3, 11, 12]. Такой подход к синтезу системы управления шагающим роботом способен обеспечить адекватное функционирование лишь малогабаритных мобильных роботов, однако совсем не пригоден для разработки тяжелых и сверхтяжелых шагающих роботов.

Основным этапом в разработке системы управления реальным объектом является получение математического описания объекта [13, 14]. В данной работе описаны этапы вывода математической модели динамики конечности с использованием метода Эйлера-Лагранжа. Данная математическая модель отражает зависимость углов в сочленениях и их производных от развивающихся в сочленениях моментов сил, при этом учитывается действие силы тяжести, силы вызванной центростремительным ускорением и силы Кориолиса, вызванной взаимодействием составных частей конечности между собой.

В статье приведены результаты моделирования, подтверждающие корректность и адекватность полученной математической модели. Данная модель может быть применена при синтезе системы управления как для малогабаритных мобильных роботов, так и для сверхтяжелых.

II. КИНЕМАТИКА КОНЕЧНОСТИ

В данной статье рассмотрен мобильный шагающий робот, конечности которого обладают тремя степенями свободы. Такую подвижность конечностям обеспечивают три вращательных сочленения. Как показано на рис. 1, оси двух сочленений параллельны друг другу и перпендикулярны оси вращения третьего сочленения [1].

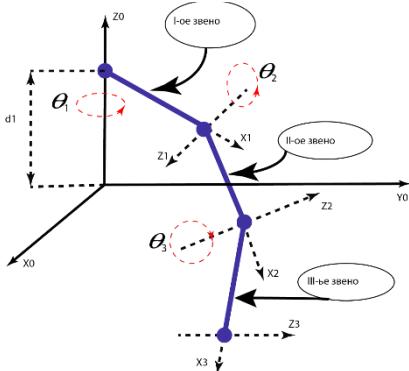


Рис. 1. Кинематическая схема конечности робота

Для кинематической схемы, приведенной на рис. 1, можно применить метод преобразований Денавита-Хартенберга и получить матрицу однородных преобразований из системы координат, фиксированной относительно крепления конечности к телу робота, в систему координат, введенную в конечной точки конечности. Подобную связь систем координат можно записать выражением (1).

$$p_0 = T_3^0 \times p_3, \quad (1)$$

где p_0 – вектор-столбец однородных координат в базовой системе координат, T_3^0 – Матрица преобразования однородных координат, p_3 – вектор-столбец однородных координат в системе координат связанной с концом конечности [2].

Для нахождения матрицы преобразований T_3^0 был применен метод Д-Х преобразований. Параметры данного преобразования приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ Д-Х ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

i	d _i	a _i	L _i	θ _i
1	d1	90	L1	θ1
2	0	180	L2	θ2
3	0	0	L3	θ3

Используя вышесказанный метод и опираясь на параметры, приведенные в табл. 1, можно записать уравнение (1) в виде уравнения (2).

$$p_0 = \begin{pmatrix} f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, L_1, L_2, L_3) \\ f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, L_1, L_2, L_3) \\ f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3, L_1, L_2, L_3, h_1) \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Для получения зависимости координат точки опоры конечности в базовой системе координат необходимо разрешить уравнение (2) относительно углов ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$). Решение данной задачи можно записать в виде выражения (3).

$$\begin{aligned} \theta_1 &= f_1(x_0, y_0, L) \\ \theta_2 &= f_2(x_0, y_0, z_0, L) \\ \theta_3 &= f_3(x_0, y_0, z_0, L, h_1) \end{aligned}, \quad (3)$$

где $f_1(), f_2(), f_3()$ – некоторые функции от своих аргументов.

III. ДИНАМИКА КОНЕЧНОСТИ

Для описания динамики конечности был выбран метод Лагранжа-Эйлера [3, 11, 14]. Данный метод применим для описания динамики неконсервативных систем. Он позволяет, пользуясь лагранжевым формализмом, на основе кинематики конечности, описанной с помощью преобразований Денавита-Хартенберга, получить динамическую модель конечности робота.

Вывод математической модели данным методом основан на:

- описании взаимного пространственного расположения систем координат i-ого и (i-1)-ого звена конечности с использованием матрицы преобразования однородных координат A_i^{i-1} ;
- на использовании уравнения Лагранжа-Эйлера (4).

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где L – функция Лагранжа, представляющая собой разность полной кинетической и полной потенциальной энергией, q_i – i-ая обобщенная координата, \dot{q}_i – первая производная по времени i-ой обобщенной координаты, τ_i – сила или момент сил, приложенный к i-ому [15].

Результатом применения данного метода является дифференциальное матричное уравнение второго порядка, устанавливающее связь между силами (или моментами сил), действующими в сочленениях и обобщенными координатами. Данное уравнение имеет вид (5).

$$\mathbf{\tau}(t) = \mathbf{D}(q(t)) \cdot \ddot{q}(t) + \mathbf{h}(q(t), \dot{q}(t)) + \mathbf{c}(q(t)), \quad (5)$$

где $\mathbf{\tau}(t)$ – вектор-столбец сил (моментов сил), действующих в сочленениях, $\mathbf{D}(q(t))$ – матрица размерностью $n \times n$, $\mathbf{h}(q(t), \dot{q}(t))$ – вектор-столбец центробежных и креолисовых сил, $\mathbf{c}(q(t))$ – вектор-столбец гравитационных сил [15].

Пусть $\mathbf{r}_i^i = [x_i, y_i, z_i, 1]^T$ – произвольная точка i-ого звена конечности, заданная в координатах i-ой системы координат. Тогда справедливо выражение (6).

$$\mathbf{r}_i^0 = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \dots \mathbf{T}_n^{n-1} \mathbf{r}_i^{i-1}. \quad (6)$$

Так как звенья конечности представляют собой твердые тела, то скорость каждой точки i-ого звена в i-ой системе координат будет нулевой, а следовательно, $\dot{r}_i^i = 0$. Тогда скорость произвольной точки относительно базовой системы координат будет выражаться уравнением (7).

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i^0 \equiv \mathbf{v}_i &= \frac{d}{dt} (\mathbf{r}_i^0) = \\ &= \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \dots \mathbf{T}_i^{i-1} \mathbf{r}_i^{i-1}) = = \left[\sum_{j=0}^i \frac{\partial \mathbf{T}_j^0}{\partial q_j} \dot{q}_j \right] \mathbf{r}_i^i. \end{aligned} \quad (7)$$

Частные производные матриц A_i^0 по переменным q_i можно найти при помощи матрицы Q , которая для вращательных сочленений принимает вид (8).

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Пусть $U_{ij} \triangleq \frac{\partial \mathbf{T}_i^0}{\partial q_j}$, тогда U_{ij} будет рассчитываться в соответствии с выражением (9).

$$\mathbf{U}_{ij} = \begin{cases} \mathbf{T}_{j-1}^0 \mathbf{Q} \mathbf{T}_i^{j-1}, & j \leq i \\ 0, & j > i \end{cases}. \quad (9)$$

Используя выражение (7), можно переписать равенство (13) в виде равенства (10).

$$\mathbf{U}_i = [\sum_{j=1}^i \mathbf{U}_{ij} \dot{q}_j] \mathbf{r}_i^i. \quad (10)$$

Пусть эффект взаимодействия сочленений будет обозначен $\frac{\partial U_{ij}}{\partial q_k} \triangleq U_{ijk}$ и выражаться формулой (11).

$$\mathbf{U}_{ijk} = \begin{cases} \mathbf{T}_{j-1}^0 \mathbf{Q} \mathbf{T}_{k-1}^{j-1} \mathbf{Q} \mathbf{T}_i^{k-1}, & i \geq k \geq j, \\ \mathbf{T}_{k-1}^0 \mathbf{Q} \mathbf{T}_{j-1}^{k-1} \mathbf{Q} \mathbf{T}_i^{j-1}, & i \geq j \geq k, \\ 0, & i < j \text{ или } i < k. \end{cases} \quad (11)$$

Пусть элемент i -ого звена массой dm обладает кинетической энергией dK_i , тогда по определению кинетической энергии кинетическая энергия данного элемента может быть рассчитана по формуле (12).

$$dK_i = \frac{(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2)}{2} dm = \frac{\text{tr}(U_i U_i^T)}{2} dm. \quad (12)$$

Тогда, используя выражение (10) и выражение (12), полную кинетическую энергию i -ого звена можно записать в виде выражения (13).

$$K_i = \frac{\text{tr} \left[\sum_{p=1}^i \sum_{k=1}^i U_{ip} \left(\int r_i^i r_i^{iT} dm \right) U_{ik} \dot{q}_p \dot{q}_k \right]}{2}. \quad (13)$$

Можно заметить, что интегральный член в скобках в выражении (14), представляет собой матрицу инерции J_i i -ого звена. Если воспользоваться тензором инерции, по определению равным выражению (15), то матрицу инерции можно представить в виде равенства (16).

$$I_{ij} = \int [\delta_{ij} [\sum_k x_k^2] - x_i x_j] dm, \quad (14)$$

где i, j, k – принимают значение x, y, z обозначая оси i -ой системы координат, δ_{ij} – символ Кронекера.

$$\begin{pmatrix} \frac{-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{xy} & I_{xz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{xy} & \frac{I_{xx} - I_{yy} + I_{zz}}{2} & I_{yz} & m_i \bar{y}_i \\ I_{xz} & I_{yx} & \frac{I_{xx} + I_{yy} - I_{zz}}{2} & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{pmatrix} \quad (15)$$

где $\bar{\mathbf{r}}_i^i = [\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, 1]^T$ – однородные координаты центра масс i -ого звена в i -ой системе координат. В силу выражения (16) полную кинетическую энергию конечности можно представить в виде выражения (17).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^i \sum_{r=1}^i [\text{tr}(U_{ip} J_i U_{ir}^T) \dot{q}_p \dot{q}_r]}{2}. \quad (16)$$

Пусть P_i – потенциальная энергия i -ого звена, а P – полная потенциальная энергия конечности. Тогда потенциальную энергию звена можно найти из выражения (18).

$$P_i = -m_i g \bar{\mathbf{r}}_i^0 = -m_i g (A_i^0 \bar{\mathbf{r}}_i^i). \quad (17)$$

Тогда используя выражение (18) можно записать полную потенциальную энергию конечности шагающего робота, как выражение (19).

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n -m_i g (A_i^0 \bar{\mathbf{r}}_i^i). \quad (19)$$

где $\mathbf{g} = [g_x, g_y, g_z, 0]$ – вектор-строка, описывающая гравитационное ускорение в базовой системе координат.

Наконец, используя выражения (17) и (19), можно записать уравнение Лагранжа-Эйлера (1) в виде выражения (20).

$$\begin{aligned} \tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \\ \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^i \left\{ \text{tr} \left(U_{jk} J_j U_{ji}^T \right) \ddot{q}_k + \right. \\ \left. + \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^i \left\{ \sum_{m=1}^j \text{tr} \left(U_{jkm} J_j U_{ji}^T \right) \dot{q}_k \dot{q}_m - \sum_{j=i}^n m_j g U_j \bar{\mathbf{r}}_j^j \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Очевидно, что выражение (20) можно записать в виде выражения (5). Также выражения (20) и (5) можно переписать в переменных состояния. Так, пусть $x_1 = \theta_1, x_3 = \theta_2$ и $x_5 = \theta_3$, а $x_2 = \dot{\theta}_1, x_4 = \dot{\theta}_2$ и $x_6 = \dot{\theta}_3$, также $\tau_1 = u_1, \tau_2 = u_2$ и $\tau_3 = u_3$. Тогда система (20) примет вид выражения (21).

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \end{cases} \quad (21)$$

где $f_1(), f_2(), f_3()$ – некоторые функции от своих аргументов.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНЕЧНОСТИ

Пусть все начальные угловые ускорения в каждом сочленении конечности равны нулю. Тогда в соответствии с моделью конечности (21) следует, что $x_2 = x_4 = x_6 = 0$. Также, пусть углы в сочленениях будут равны $x_1 = 0, x_3 = -\pi/2, x_5 = 0$. Тогда в соответствии с рис. 1, два последних звена конечности будут образовывать прямую линию, направленную вдоль действия силы тяжести. Так как звенья конечности в данной задачи считаются твердыми телами, а первое звено способно вращаться лишь вокруг оси направленной вдоль вектора силы тяжести, а два последних звена заняли положения, при котором момент сил создаваемый силой тяжести равен нулю, то при моделировании углы и угловые скорости во всех трех сочленениях должны оставаться неизменными на всем протяжении моделирования при u_1, u_2, u_3 .

Результатом моделирования при параметрах конечности, приведенных в табл. 2, будут служить графики переходных процессов по углам и угловым скоростям в сочленениях.

По графикам переходных процессов, полученных в результате моделирования, был сделан вывод о том, что все переменные состояния являются константными величинами.

ТАБЛИЦА 2. ПАРАМЕТРЫ КОНЕЧНОСТИ РОБОТА

i	m _i , кг	L _i , м
1	1	0.08
2	1	0.08
3	1	0.1

Пусть угловые ускорения также будут равны нулю, а углы в сочленениях заданы следующим образом: $x_1 = 0, x_3 = -\pi/12, x_5 = 0$. Тогда, исходя из кинематической схемы, представленной рис. 1, при отсутствии моментов сил, создаваемых приводами, угол поворота первого сочленения должен быть постоянен по времени, а углы во втором и третьем сочленениях будут совершать сложные периодические колебания.

На рис. 2 представлены результаты моделирования при условиях, указанных выше и параметрах конечности робота, приведенных в табл. 2. На данном рисунке показана зависимость углов в сочленениях от времени.

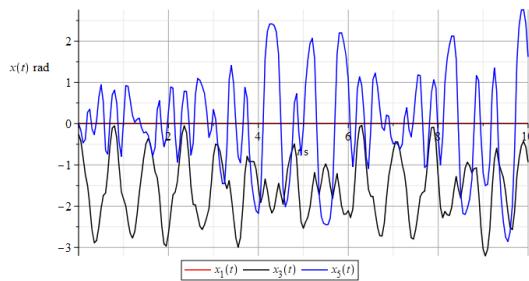


Рис. 2. Зависимость углов в сочленениях от времени при отсутствии момента сил

Как видно из рис. 2, второе и третье звенья конечности совершают сложные периодические колебания.

Пусть параметры конечности будут такими, как показано в табл. 3, тогда третья звено конечности не будет оказывать влияние на второе звено, а следовательно, без силы трения в сочленениях и отсутствия моментов сил, развиваемых приводами, второе звено должно совершать гармонические колебания.

ТАБЛИЦА 3. ПАРАМЕТРЫ КОНЕЧНОСТИ РОБОТА

i	m _i , кг	L _i , м
1	1	0.08
2	1	0.08
3	0	0

Результаты моделирования системы при условиях, указанными выше приведены в виде графиков зависимости угла и угловой скорости от времени во втором сочленении на рис. 3 и 4 соответственно.

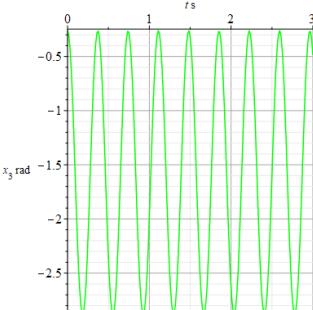


Рис. 3. Зависимость угла от времени во втором сочленении

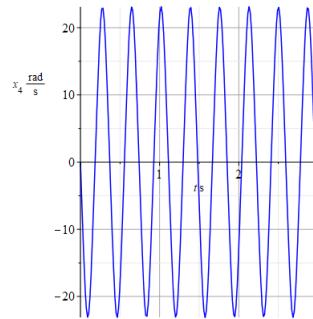


Рис. 4. Зависимость угловой скорости от времени во втором сочленении

Как видно из рис. 3 и 4, при нулевой массе и длине третьего звена оно не оказывает влияние на второе звено, вследствие чего второе звено совершает гармонические колебания как это и предполагалось.

Приведенные выше графики переходных процессов косвенно подтверждают адекватность и достоверность полученного математического описания динамики конечности робота.

V. СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКОГО ВЕКТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА

В данной работе в качестве системы управления позиции конечности будет применен векторный астатический регулятор, полученный методом АКАР (аналитическое конструирование агрегированных регуляторов) [16].

Для этого, в систему (21) будут добавлены функции возмущающих воздействий. Таким образом система (21) примет вид системы (22) [17].

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + z_1 \\ \dot{x}_2 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \\ \dot{x}_3 = x_4 + z_2 \\ \dot{x}_4 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \\ \dot{x}_5 = x_6 + z_3 \\ \dot{x}_6 = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \\ \dot{z}_1 = k_1(x_1 - x_1^*) \\ \dot{z}_2 = k_2(x_3 - x_3^*) \\ \dot{z}_3 = k_3(x_5 - x_5^*) \end{cases}, \quad (22)$$

где z_1 – возмущение, действующее на первое звено, z_2 – возмущение, действующее на второе звено, z_3 – возмущение, действующее на третье звено, k_1, k_2, k_3 – некоторые числовые коэффициенты.

Также пусть будут введены инвариантные многообразия (23) и основные функциональные уравнения (24).

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_1 + z_1 + \alpha_1(x_1 - x_1^*) + \beta_1 z_1 = 0 \\ \psi_2 &= x_3 + z_2 + \alpha_2(x_3 - x_3^*) + \beta_2 z_2 = 0 \\ \psi_3 &= x_5 + z_3 + \alpha_3(x_5 - x_5^*) + \beta_3 z_3 = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{cases} T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0 \\ T_2 \dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0 \\ T_3 \dot{\psi}_3 + \psi_3 = 0 \end{cases} \quad (24)$$

Тогда в силу уравнений системы (22), декомпозированной на инвариантных многообразиях (23), система основных функциональных уравнений (24) успешно разрешается относительно вектора управляющего воздействия (25) [16, 17].

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, z_1, z_2, z_3) \\ u_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, z_1, z_2, z_3) \\ u_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, z_1, z_2, z_3) \end{pmatrix} \quad (25)$$

Пусть модель системы (21) будет дополнена аддитивно входящими возмущающими воздействиями и примет вид (26).

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + m_1(t) \\ \dot{x}_2 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \\ \dot{x}_3 = x_4 + m_2(t) \\ \dot{x}_4 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \\ \dot{x}_5 = x_6 + m_3(t) \\ \dot{x}_6 = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, u_1, u_2, u_3) \end{cases} \quad (26)$$

где $m_1(t), m_2(t), m_3(t)$ – функции возмущающих воздействий, оказывающих влияние на систему.

Пусть параметры системы и возмущающих воздействий будут иметь вид, представленный в табл. 4, а начальные условия моделирования следующими: $x_i(0) = 0, i = 1..6$, $z_i(0) = 0, i = 1..3$. Если задать идеальные значения управляемых переменных как $x_1 = -1, x_3 = 2, x_5 = 1$, тогда в ходе моделирования можно получить графики переходных процессов, вид которых представлен рис. 5.

ТАБЛИЦА 4. УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

i	mi(t)	mi	Li	Ti	ai	Bi	ki
1	0.3	1	0.1	0.01	1	0.01	0.2
2	-0.1	1	0.1	0.01	1	0.01	0.05
3	-0.2	1	0.1	0.01	1	0.01	0.15

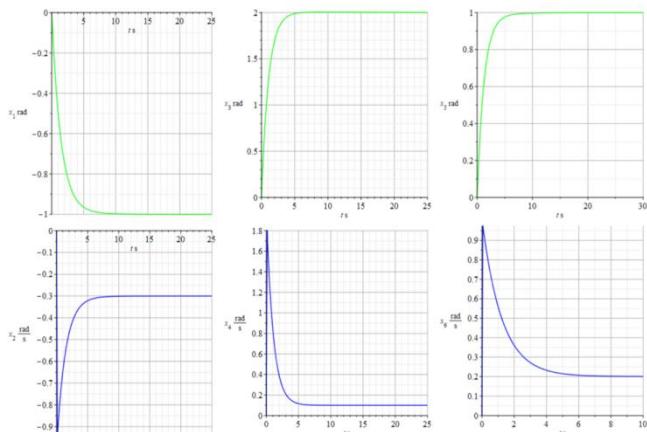


Рис. 5. Графики переходных процессов системы

Из графиков переходных процессов следует, что астатический векторный регулятор корректно функционирует, сводя статическую ошибку к нулю, тем самым обеспечивая требуемое позиционирование конечности.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как можно заключить из изложенного в предыдущих главах, синтезированная математическая модель учитывает сложность взаимодействия компонентов конечности между собой и влияния на эти компоненты внешних сил, таких как сила тяжести и сила кориолиса. Использование данной модели при синтезе систем управления, позволит поднять точность управления роботом и тем самым увеличить эффективность функционирования такого робота.

Также в работе был показан синтез астатического векторного регулятора на основе полученной математической модели, который корректно функционирует при действии возмущающего воздействия.

Полученная модель может успешно быть применена при синтезе шагающих роботов с относительно большой массой конечностей, так как учитывает динамику звеньев и сочленений.

VII. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта научно-исследовательской магистратуры Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета ГрМГ/21-02-КТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов В.В., Соловьева Т.Н., Попов В.П. Моделирование кинематики шагающего робота // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6. – С. 50-56.
2. Sorin O., Mircea N. Hexapod Robot. Mathematical Support for Modeling and Control // 15th International Conference on System Theory, Control and Computing. – 2011. – Р. 1-6.
3. Yildirim, S., Arslan E. ODE (Open Dynamics Engine) based stability control algorithm for six-legged robot // Measurement. – 2018. – Vol. 124. – P. 367-377.
4. Zhang S., Hu Y., Xing Y. Modified kinematic models for wheel-legged robot considering the rolling effect during leg-support phase // 36th Chinese Control Conference. – 2017. – P. 6851-6855.
5. Nozaki K., Murakami T. A motion control of two-wheels driven mobile manipulator for human-robot cooperative transportation // Proceedings of 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2009. – P. 1574-1579.
6. Silva M. F., Machado J.A.T. A historical perspective of legged robots // J Vib Control. – 2007. – Vol. 13. – P. 1447-1486.
7. Lee, W.J., Orin D.E. The kinematics of legged locomotion over uneven terrain // In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco. – 1986. – P. 1490-1495.
8. Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot // In: Proceedings of 17th World Congress on the International Federation of Automatic Control, Seoul. – 2008. – P. 10822-10825.
9. Wooden D., Malchano M., Blankespoor K., Howard A., Rizzi A.A., Raibert M. Autonomous navigation for BigDog // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2010. – P. 4736-4741.
10. Irawan A., Nonami K. Compliant walking control for hydraulic driven hexapod robot on rough terrain // J Robotics Mechatron. – 2011. – Vol. 23. – P. 149-162.
11. Roy S.S., Pratihar D.K. Dynamic modeling, stability and energy consumption analysis of a realistic six-legged walking robot // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2013. – Vol. 29, Iss. 2. – P. 400-416.
12. Deng H., Xin G., Zhong G., Mistry M. Object carrying of hexapod robots with integrated mechanism of leg and arm // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2018. – Vol. 54. – P. 145-155.
13. Shaukat A., Boyer F., Porez M. Terrestrial Locomotion Modeling Bio-inspired by Elongated Animals // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 7. – P. 317-319.
14. Yildirim S., Arslan E. ODE (Open Dynamics Engine) based stability control algorithm for six-legged robot // Measurement. – 2018. – Vol. 124. – P. 367-377.
15. Shala A., Likaj R. Dynamic modeling of 3 DoF robot manipulator // ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering. – 2018. – Vol. 11. – P. 95-98.
16. Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 10. – С. 667-669.
17. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Кузьменко А.А., Погорелов М.Е., Кондратьев И.В. Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы. – 2-е изд., стереотип. – М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2013. – 304 с.

Секция V

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
И УПРАВЛЕНИЕ**

DOI: 10.18522/syssyn-2021-36

**Астроклиматические и технические ограничения
спектроскопии звёзд на БТА**

Власюк Валерий Валентинович

Специальная астрофизическая обсерватория Российской
академии наук (САО РАН)
п. Нижний Архыз, Россия
vvlas@sao.ru

Панчук Ася Владимировна

Специальная астрофизическая обсерватория Российской
академии наук (САО РАН)
п. Нижний Архыз, Россия
Северо-Кавказский федеральный университет
г. Ставрополь, Россия
panchukasya@gmail.com

Аннотация. 6-метровый телескоп БТА уже работает 45 лет, т.е., намного больше, чем продолжительность работ по выбору места для сооружения Специальной астрофизической обсерватории. Анализ статистики метеоусловий и технических условий эксплуатации телескопа позволяет откорректировать некоторые представления об эффективности БТА, как самостоятельного исследовательского комплекса, так и по отношению к другим отечественным наземным телескопам.

Annotation. The 6-meter BTA telescope has already been operating for 45 years, what is much longer than the duration of activities on choosing a site for the construction of the Special Astrophysical Observatory. Analysis of the statistics of meteorological conditions and technical operating conditions of the telescope allows to refine some ideas about the effectiveness of BTA, both as an independent research complex and in relation to other domestic ground-based telescopes.

Ключевые слова: астроклимат, астрономическая спектроскопия.

Key words: *astroclimate, astronomical spectroscopy.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема эффективности современных астрономических наблюдений является междисциплинарной. Требуется объединять технологии, развивающиеся в таких дисциплинах и направлениях, как физика атмосферы, теория турбулентности, оптика и спектроскопия, управление сложными оптико-электронными системами.

II. АСТРОКЛИМАТ РЕГИОНА

С точки зрения астронома, изучение климата необходимо для решения следующих задач. Во-первых, это задача поиска и выбора места для строительства астрономической обсерватории. Решение этой задачи начинается с анализа климатических характеристик, и продол-

жается астроклиматическими методами. Во-вторых, это задача краткосрочного и долгосрочного прогнозов метеоусловий на периоды астрономических наблюдений. Сейчас это облегчается как развитием метеорологических информационных систем, так и опытом эксплуатации телескопа в течение десятилетий. В-третьих, это задача исследования теплового режима телескопа и башни, защищающей телескоп от атмосферных воздействий. Здесь необходимо изучить взаимодействие атмосферы и подстилающей поверхности, определить пространственные и временные градиенты основных характеристик.

Недостаточная разработанность горной климатологии объясняется несколькими причинами: а) сложностью горных климатов, разнообразием их как по высоте, так и в горизонтальном направлении; б) недостаточной сетью горных метеорологических станций, размещенных преимущественно в обжитых районах (т.е. в долинах); в) кратковременностью и сезонной избирательностью экспедиционных наблюдений в горах; г) неприменимостью расчетных методов (разработанных для равнинных территорий), для получения климатических характеристик в горных условиях. Большинство современных обсерваторий расположено именно в горных районах, отдаленных от основных центров человеческой деятельности. Природа горной территории порождает множество местных условий, поэтому любая горная метеостанция является репрезентативной только для ограниченного числа мест. При выполнении стандартных наблюдений погоды на горных станциях возникают трудности, связанные с орографическими особенностями окружения и частой облачностью на уровне станции. Подавляющее большинство астрономических наблюдений выполняется ночью, т.е. в периоды, практически не исследованные стандартными метеорологическими методами (сетевые

метеорологические наблюдения выполняются всего в один ночной срок). Последнее обстоятельство повлияло на заниженные оценки количества ясного ночного времени (в часах), сделанные по данным сетевых метеостанций.

Перечислим циркуляционные процессы, значимые для Северо-Кавказского региона. В зимний период определяющими являются евроазиатские антициклоны и циклоны полярного фронта. При этом циклонические условия на Западном Кавказе часто обязаны распространению средиземноморских циклонов, углубившихся над Черным морем. Фронты, задерживаясь над осевыми хребтами, обуславливают продолжительную непогоду в горных районах. Летом Главный Кавказский хребет (ГКХ) находится либо: а) под воздействием отрогов Азорского антициклона, б) в области малоградиентного барического поля с развитой вертикальной конвекцией и выпадающими во второй половине дня осадками, в) оказывается во фронтальной зоне западноевропейских циклонов. В районе установки БТА антициклоны появляются чаще почти во все месяцы года, за исключением июня и июля, где превышение дней с антициклонами невелико. Летние ночи короткие, так что на годичной статистике ясного ночного наблюдательного времени это превышение оказывается незначительно. Осенний период характерен абсолютным преобладанием дней с антициклонами и совсем малой циклоничностью. Однако горная зона Западного Кавказа не всегда соответствует указанной статистике, уровень циклоничности для нее выше из-за того, что орографическая окклюзия, возникающая над ГКХ, более длительный срок определяет циклоническую погоду в горном районе, чем в предгорьях и на равнинах Северного Кавказа. В зимне-весенний период влияние Черноморской барической депрессии проявляется чаще в горных районах, чем в северных предгорьях и равнинах Северного Кавказа.

III. ПРОБЛЕМА ВЫБОРА МЕСТА ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА

Относительно работ по выбору места установки крупнейшего в мире телескопа отметим следующие факты. В Постановлении Президиума АН СССР от 16 декабря 1960 г. в п.1 указано «ГАО АН СССР продолжить обследовать Кисловодск, Зеленчукскую. Представить материалы и сведения об окончательно выбранном пункте в ОФМН АН СССР к 01 октября 1961 г.» [1]. В монографии [2] отмечено, что ночные наблюдения на ГСС ГАО (район Кисловодска, высота над уровнем моря $h = 2100$ м) продолжались с декабря 1957 г. по июль 1962 г. В работе [3] отмечено, что с июля 1960 г. по апрель 1961 г. наблюдения качества астрономических изображений проводились в станице Зеленчукская ($h = 936$ м), а с мая 1961 г. по август 1966 г. – в пункте Семиродники ($h = 2280$ м). Требование Президиума АН СССР «продолжить обследовать Зеленчукскую» выполнялось с мая по октябрь 1961 г., в 6 пунктах Зеленчукского района (расположенных выше Зеленчукской, диапазон высот $h = 1685 \div 2300$ м), см. [4]. Задание на проектирование поселка САО (где уже фигурировало место установки БТА, $h = 2070$ м) было утверждено на заседании Астрономического Совета 07 февраля 1962 г. [1]. Итак, до принятия окончательного решения, собственно место установки БТА в астроклиматическом отношении практически не исследовалось, а исследовались другие пунк-

ты Зеленчукского района, причем в сезон коротких ночей. Методика исследований, принятая на то время, позволила лишь установить корреляцию среднего угла турбулентии с высотой пункта. Эффекты приземного слоя атмосферы (зависимость угла турбулентии t от флуктуаций плотности и скорости ветра), обнаруженные в работе [5], в последующих исследованиях не рассматривались.

Основой астроклиматической концепции Данжона-Куде, в рамках которой была составлена программа поиска места установки БТА, является эмпирическая зависимость угла турбулентии с зенитным расстоянием z [7]. Экспедиционные измерения качества и динамики изображений звезд давали опосредованные представления об угловых диаметрах звездных изображений, которые будут наблюдаться в телескоп большого диаметра ($D > 1$ м). При этом астрономам не удалось договориться, по какому закону угол турбулентии t , измеренный на телескопах экспедиционных диаметров ($D \leq 0,2$ м), изменяется с зенитным расстоянием z . Как экспериментаторами (Данジョン и Куде, Колчинский, Кучеров, Дарчия), так и теоретиками (Красильников, Татарский) предлагались различные варианты: $t_z = t_0 \sec^{1/2} z$, $t_z = t_0 \sec z$, $t_z = t_0 \sec^k z$, $t_z = t_0 \sec^k z$, $t_z = t_0 \sec^k z + t_1$. Ни один из этих вариантов не подтвердился после обработки материалов Кубанской экспедиции ГАО АН СССР, где была проверена зависимость $t_z = t_0 + k \tan z$, полученная из «чисто рефракционных соображений» [7]. Итак, результаты различных авторов, приведенные к зениту по различным зависимостям, имеют дополнительный, «не-эмпирический» разброс, связанный с признанием той или иной зависимости. Положение усложняется еще и тем обстоятельством, что, кроме (трудоемких в обработке) фотографических следов дрожания изображений звезд, по программе астроклиматических исследований ГАО АН СССР выполнялись визуальные оценки качества дифракционной картины (КДК) в дискретной шкале, ограничивающей точность перехода от балла КДК к значению угла турбулентии. Например, если оценки КДК выполнялись по пятибалльной шкале Пиккеринга (в отдельных случаях – с точностью до половины балла), то выбор той или иной зависимости t от z был затруднен, из-за грубого разбивания шкалы.

При работе телескопов САО была получена информация, позволяющая провести сравнения предсказаний и практических измерений. В октябре 1972 г. в САО был установлен рефлектор ($D = 0,6$ м), в 1961–1966 гг. для оценок КДК и регистрации дрожаний изображений использовался экспедиционный телескоп АЗТ-7 ($D = 0,2$ м), установленный в пункте «Звездный», на расстоянии 4,5 км (по прямой) от места установки БТА. Качество изображений, оцениваемое на БТА визуально (относительно ширины щели спектрографа или разрыва в центре креста нитей), во второй половине 70-х – начале 80-х отмечалось в карточках, заполняемых астрономами при наблюдениях каждого объекта. После внедрения (вторая половина 80-х) телевизионных подсмотров щелей спектрографов БТА (с возможностью регулировки яркости и контраста изображений), объективность оценок качества изображений не возросла. Это объяснимо тем обстоятельством, что две группы (исследователи галактик и исследователи звезд), продвигавшие на БТА цифровые методы регистрации изображений и спектров, не имели

единой шкалы объективных оценок изображений, по данным цифровых телевизионных приемников разного типа, используемых для спектроскопии галактик и звезд. Объективная статистика качества изображений стала возможной только по данным архива ASPID [8], где с 1994 г., наряду с данными спектроскопических, интерферометрических и фотометрических наблюдений, выполненных на приборах, разработанных проф. Афанасьевым В.Л., собраны данные о качестве изображений, измеряемых на матрицах ПЗС. Оказалось, что медианная оценка качества изображений на БТА составляет 1,53 угл.сек, что значительно отличается от средней величины 1,67 угл.сек. [9]. По данным работы [10], средняя величина качества изображений за 1977 год составляла 2,5 угл.сек. Такое серьёзное различие с данными архива ASPID объясняем эффектами селекции. В первые годы эксплуатации БТА астрономы, в стремлении научиться работать на новом инструменте, наблюдали при любых условиях (проходящих по техническим ограничениям на эксплуатацию телескопа). Поэтому гистограмма распределения качества изображений показывает асимметрию в сторону плохих изображений (см. рис. 2c в [9]). А в архиве ASPID содержатся данные о наблюдениях слабых объектов, наблюдения которых при плохом качестве изображений (более 3-х угл.сек.) невозможны. Приходим к выводу, что различия о среднем качестве изображений, регистрируемых в первые два года работы телескопа и в период после 1994 г., связаны с принятием решений о начале наблюдений. Кроме того, на разность в 1 угл.сек. «работает» и то обстоятельство, что в статистику 1976–1977 гг. включены наблюдения ярких звезд на Основном звездном спектрографе (ОЗСП), выполненные и при очень плохих изображениях (> 4 угл.сек.).

Для сравнения отметим, что:

- а) на сайте Крымской астрофизической обсерватории ($h = 590$ м) для телескопа ЗТШ ($D = 2,65$ м) указано среднее значение FWHM = 2,12 угл. сек.;
- б) для телескопа КГО ГАИШ ($D = 2,5$ м), установленного на пункте Шатджатмаз ($h = 2112$ м) медианное качество изображений составляет 0,93 угл.сек. [11];
- в) для телескопа ($D = 2,0$ м) обсерватории на пике Терскол ($h = 3150$ м) среднее качество изображений составляет около 1 угл.сек., [12]
- г) для телескопа АЗТ-22 ($D = 1,5$ м), установленного на пункте Майданак ($h = 2650$ м) медианное качество изображений составляет 0,96 угл.сек., наиболее вероятное – 0,81 угл.сек. [13].

Указанные различия обусловлены как различиями региональных астроклиматических характеристик, так и эффектами, связанными с конструктивными особенностями оптико-механических систем телескопов и их башен.

IV. Башня и ТЕЛЕСКОП

Наблюдателям известно, что через некоторое время после открытия башни БТА качество изображений постепенно улучшается (в безветренную погоду). Более того, в течение первых экспозиций становится заметным, что положение фокуса телескопа «уходит» и нуждается в корректировке. Эти эффекты особенно заметны, когда разность температур воздуха подкупольного про-

странства и воздуха свободной атмосферы составляет несколько градусов. После того, как оптика телескопа САО ($D = 1$ м) была отьюстирована [14], отмечается качество изображений, заметно превосходящее наблюдаемое в эту же (безветренную) ночь на БТА. В работе [15] показано, что существует принципиальная возможность разделения температурных эффектов, проявляющихся на оптических и металлических деталях телескопа и прилегающих объемов воздуха, но необходима более точная взаимная калибровка многочисленных термодатчиков. По журналам наблюдений на приборах высокого спектрального разрешения обнаружена и исследуется корреляция качества изображений звёзд с температурой подкупольного пространства.

Анализ потерь наблюдательного времени БТА по техническим причинам и ограничениям на условия эксплуатации [16] показал, что потери наблюдательного времени, связанные с ограничениями по перепаду температур «наружный воздух – воздух подкупольного пространства», составляет (в среднем, за 10 лет) 9 ночей в год. Сравнение с периодами работы системы охлаждения подкупольного пространства показало, что работа этой системы приносит, в среднем, 3 ночи в год (но, как правило, это ночи с невысоким качеством изображений). Дальнейший выигрыш связываем с дополнительной изоляцией тепловыделяющих помещений башни от объема подкупольного пространства. Если сравнить среднее качество изображений, регистрируемых на трех обсерваториях Северного Кавказа, то эффект башни тоже просматривается, точнее, в башнях меньшего объема – объем подкупольного пространства быстрее приобретает температуру свободной атмосферы. Наличие ветра усложняет исследования эффекта, т.к. проявляются дополнительные эффекты, возникающие на створках открытого купола.

В работе [17] обращалось внимание на связь особенностей оптико-механической конструкции БТА и качества изображений. В развитие этой темы, при работе локальных корректоров изображений в фокусах БТА обнаружена и исследуется природа низкочастотных (порядка 1 Гц) колебаний положения центра изображения звезды. Удалось разделить колебания аппаратурного и атмосферного происхождения. После решения проблемы компенсации низкочастотных колебаний, в проблеме широкополосности (см. [18].), на первый план выходит задача подфокусировки изображений звёзд в реальном времени.

В течение четверти века автоматические метеостанции САО РАН представляли одну из редких возможностей сбора метеопараметров в предгорьях Северного Кавказа. Эти возможности планируется развивать, для исключения влияния местных эффектов орографического происхождения.

V. Выводы

Характерные времена, на которых осуществлялся поиск по выбору мест для установки телескопов, намного уступают характерным временем (десятилетия, см. [19]), на которых происходят статистически значимые измене-

ния астроклиматических параметров. Поэтому на любой обсерватории необходимо продолжать набор необходимых характеристик, с целью сравнения с параметрами, получаемыми при работе телескопов разных диаметров. Это составит эмпирическую основу, как для поиска новых мест, так и для улучшения характеристик уже работающих телескопов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение №05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Копылов И.М. Краткая история Специальной астрофизической обсерватории АН СССР (1960-1984): В кн. «И.М.Копылов – полвека в астрофизике» / под редакцией Ю.Ю. Балеги и В.Г. Клочковой. – Издво САО РАН 2003. – С. 8-100.
2. Дарчия Ш.П. Об астрономическом климате СССР. – М.: Наука, 1985. – 175 с.
3. Васильев О.Б., Нелибин Н.Ф. Исследования качества астрономических изображений в месте установки БТА. Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1970. – Т. 1. – С. 125-134.
4. Панчук А.В. Атмосферная турбулентность и потери света при спектроскопии астрономических объектов. II. Проблема качества изображений // VIII (65-я) ежегодная научно-практическая конференция СКФУ «Университетская наука – региону». Апрель 2021.
5. Нелибин Н.Ф. О природе низкочастотной составляющей в дрожании звёзд // Астрофизические исследования (Известия САО). – 1972. – Т. 4. – С. 201-207.
6. Данジョン А., Кудэ А. Атмосферное волнение (Глава 5 книги “Lunettes et Telescopes”, A. Danjon et A. Couder, 1935, перевод и редакция Д.Д. Максутова) // Астрономический журнал. – 1940. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 77-89.
7. Васильев О.Б. О зависимости дрожания звезд от зенитного расстояния.. В кн. Оптическая нестабильность земной атмосферы. – М.-Л.: Наука, 1965. – С. 40-48.
8. Афанасьев В.; Афанасьева И.; Афанасьева Г. и др. ASPID: Архив спектральных фотометрических и интерферометрических данных. – URL: <http://alcor.sao.ru/db/aspid/about.html>.
9. Panchuk V.E.; Afanas'ev V.L. Astroclimate of Northern Caucasus - Myths and reality // Astrophysical Bulletin. – 2011. – Vol. 66, Issue 2. – P. 233-254.
10. Ерохин В.Н. Научно-технический отчет САО АН СССР. – № 60. 1979.
11. Kornilov V.; Shatsky N.; Vozniakova O., et al. First results of a site-testing programme at Mount Shatdzhmatmaz during 2007-2009 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2010. – Vol. 408, Issue 2. – P. 1233-1248.
12. Международный центр астрономических, медицинских и экологических исследований. – URL: <http://www.terskol.com/telescopes/> index.htm.
13. Артамонов Б.П., Бруевич В.В., Гусев А.С. и др. Качество изображения и атмосферная экстинкция на Майданакской обсерватории по наблюдениям с 1.5-м телескопом АЗТ-22 // Астрономический журнал. – 2010. – Т. 87, № 11. – С. 1106-1119.
14. Drabek S.V.; Komarov V.V.; Potanin S.A.; et al. Study of the quality of the Zeiss-1000 telescope optical system using the Shack-Hartmann wavefront sensor // Astrophysical Bulletin. – 2017. – Vol. 72, Issue 2. – P. 206-216.
15. Emelianov E.V. Analysis of thermal conditions of the 6-m BTA telescope elements and the telescope dome space // Astrophysical Bulletin. – 2015. – Volume 70, Issue 3. – P.362-370.
16. Panchuk A.V. Astronomical climate of the telescope installation site and observation time loss // INASAN Science Reports. – 2020. – Vol. 5 (6). – P. 344-350.
17. Klochko V.G., Sheldakova Yu.V., Vlasuk V.V., and Kudryashov A.V. Improving the efficiency of high-resolution spectroscopy on the 6-m telescope using adaptive optics techniques // Astrophysical Bulletin. – 2020. – Vol. 75, No. 4. – P. 360.
18. Панчук А.В. Атмосферная турбулентность и потери света при спектроскопии астрономических объектов. I. Проблема широкощельности. // VIII (65-я) ежегодная научно-практическая конференция СКФУ «Университетская наука – региону». Апрель 2021.
19. Дзэрдзеевский Б.Л. Общая циркуляция атмосферы и климат. – М.: Наука, 1975. – 286 с.

Цифровизация – осознанная необходимость или неосознанная неизбежность?

Витковский Владимир Валентинович
Лаборатория информатики
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия
vvv@sao.ru

Горохов Владимир Леонидович
Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
г. Санкт-Петербург, Россия
vlgorohov@mail.ru

Желенкова Ольга Петровна
Лаборатория информатики
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
пос. Нижний Архыз, КЧР, Россия
mas@sao.ru

Аннотация. В настоящее время под термином цифровизация понимается совокупность технических, социальных и экономических явлений, связанных с прогрессом, развитием и внедрением компьютерных и инфокоммуникационных технологий во все сферы деятельности человека и общества. В представленной работе делается попытка тщательно изучить и разделить технические, экономические и социальные аспекты цифровизации в основополагающих руководящих документах, с целью приблизится к ответу на вопрос указанный в заглавии: этот процесс необходим или неизбежен. Соответственно – кто управляет им Человек или Общество?

Annotation. Currently, the term digitalization is understood as a set of technical, social and economic phenomena associated with the progress, development and implementation of computer and information and communication technologies in all spheres of human activity and society. In the presented work, an attempt is made to carefully study and separate the technical, economic and social aspects of digitalization in the fundamental guiding documents, in order to get closer to the answer to the question indicated in the title: this process is necessary or inevitable. Accordingly, who controls it, a Person or a Socium?

Ключевые слова: Методы и технологии анализа гетерогенных Big Data, интеллектуальный анализ больших систем, когнитивные технологии.

Keywords: Methods and technologies analyzing heterogeneous Big Data, intelligent analysis of large systems, cognitive technologies.

I. ВВЕДЕНИЕ

... кто же управляет жизнью человеческой и всем вообще распорядком на земле?

М. Булгаков

Итак, Цифровизация объявлена, причём не только объявлена, но и закреплена правительственными постановлениями и поддержана государственным финансированием. По степени доступности и активного использования цифровой экономики: электронной коммерции, интернет-банкинг, электронные платежи, интернет-рекламу и электронный доступ к государственным услугам определяют DEI, Digital Evolution Index – индекс цифровизации государства [1]. Появились проекты цифровой трансформации в любой прикладной области: от нефтегазового сектора до образования, оптимизации

бизнес-процессов, больших данных (Big Data), машинного обучения (Machine Learning), интернета вещей (Internet of Things) и т.д., и т.п., и др., и проч. Научное сообщество делает попытки формализации этого явления. И уже на этом этапе возникает непонимание и радикально отличающиеся трактовки смысла термина **цифровизация** в точных и гуманитарных науках. Первоначально, бурное развитие вычислительной техники и техники связи позволило инженерам и математикам ввести термин информатика, который отразил сущность технических явлений. Огромное влияние информационных технологий на социум заставило социологов и политологов ввести социологический термин **информационное общество, коммуникации в социуме**. В рамках социологических и политологических наук этот термин отразил определённый круг социальных явлений. Аналогично поступили и экономисты, введя термин **цифровая экономика**. Здесь опасность заключается в том, что эти термины в разных науках трактуются по разному, что приводит к возможным недоразумениям, которые чреваты серьёзными технологическими, экономическими и социальными катастрофами.

Возникают угрозы безопасности жизнедеятельности на уровне общества, экономики и техники. Достижения вычислительной техники и компьютерных наук (обработка и передача данных в цифровом представлении) создали такие технические новации (информационно-телекоммуникационные сети, интернет, браузеры, блоги, коды с открытыми ключами, облака, машинное обучение, системы распределённого реестра), которые привели к фундаментальным социальным явлениям типа социальных сетей и криптовалют и т.д. Принятый обществом термин **цифровизация** коварно включает в себя оба эти явления (технику обработки цифровых данных и социальные последствия внедрения этой техники). Однако не следует забывать, что эти социальные явления, помимо положительных последствий, могут нести огромную, пока плохо предсказуемую угрозу для таких сложных и малоизученных больших систем, как человек и общество.

Отчасти причина многих негативных социальных последствий, кроется в природе технических новаций. Недопонимание гуманитариями технических особенностей, а подчас и технической сути процессов **цифровизации** является серьёзной опасностью. Этот факт был отмечен в книге Ричарда Кларка и Роберта Нейка «Третья миро-

вая война, какой она будет?» [3]. Аналогичная ситуация уже возникала в атомной промышленности и потребовались серьёзные усилия со стороны инженеров и физиков для разъяснения этого недопонимания гуманитариям. Данная статья может считаться скромной попыткой разделения технической сути термина цифровизация и гуманитарной интерпретации этого термина.

Для преодоления сформулированных выше опасностей требуется, прежде всего, тщательно установить особенности трактовки ряда терминов принятых в гуманитарных и технических науках. Требуется внимательное прочтение и адекватная трактовка ключевых административных документов определяющих процессы цифровизации. Разумеется, это трудная задача, требующая междисциплинарной эрудиции, но другого пути, похоже, нет! Сделаем робкую попытку начать решение этой трудной задачи с термина ставшего ключевым – **цифровизация**, на примере анализа текстов ряда руководящих административных документов.

II. ОСОЗННАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ

Бывает нечто, о чем говорят: «смотри, вот это новое»; но это было уже в веках, бывших прежде нас.

Еккл.1:10

Утверждённая Распоряжением Правительства РФ № 1632-р от 28 июля 2017г. Программа "Цифровая экономика Российской Федерации" определяет данные в цифровой форме ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности, что по убеждению её разработчиков повысит конкурентоспособность страны и качество жизни граждан, а также обеспечит экономический рост и национальный суверенитет. Целями Программы были объявлены «создание экосистемы цифровой экономики Российской Федерации», в которой будут реализованы «условия для развития общества знаний». Будет повышен благосостояние и улучшено качество жизни граждан «путём повышения доступности и качества товаров и услуг, произведённых в цифровой экономике с использованием современных цифровых технологий». Повысится степень информированности и цифровой грамотности, доступность и качество государственных услуг, а также безопасность «как внутри страны, так и за её пределами».

Цифровая экономика представлена тремя уровнями, в тесном взаимодействии влияющими на жизнь граждан и общества в целом:

- экономический аспект (рынки и отрасли экономики);
- технический аспект (платформы и технологии, формирующие компетенции для развития рынков и отраслей экономики);
- социологический аспект (социальная среда, создающая условия для развития платформ и технологий и эффективного взаимодействия субъектов рынков и отраслей экономики охватывающая «нормативное регулирование, информационную инфраструктуру, кадры и информационную безопасность).

Программа, опираясь на утверждённую Указом Президента РФ от 9 мая 2017 г. N 203 **Стратегию развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы**, постулирует цифровую экономику, как **хозяйственную деятельность**, «ключевым фактором производства, в которой являются данные в цифровой форме», способствующую формированию «информационного общества». Эта хозяйственная деятельность должна учитывать потребности граждан и общества в получении «качественных и достоверных сведений». Программа должна способствовать развитию российских информационно-телекоммуникационных (ИТК) технологий и модернизации на их основе социальной и экономической ИТК инфраструктуры Российской Федерации. Определять общую логику и архитектуру взаимодействия людей, государства и бизнеса в цифровой экономике. Обеспечивать непрерывный мониторинг средств массовой информации, социальных сетей и информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

В рамках программы «Цифровая экономика» определено девять, названных «сквозными», ключевых технологий, причём любая из них может полностью поменять правила игры сразу в нескольких отраслях экономики. Для реализации и внедрения каждой из них подготовлены поэтапные планы развития и меры организационной, финансовой и юридической поддержки («дорожные карты»). В целом, осознание требующих решения проблем цифровизации экономики выглядит удовлетворительно, хотя к тексту Программы можно предъявлять терминологические и смысловые претензии.

К примеру, основными «сквозными цифровыми» технологиями, объявленными в Программе, являются в весьма эклектическом наборе: «большие данные; нейротехнологии и искусственный интеллект; системы распределённого реестра; квантовые технологии; новые производственные технологии; промышленный интернет; компоненты робототехники и сенсорика; технологии беспроводной связи; технологии виртуальной и дополненной реальности».

Иерархия эклектики начинается с самого новообразованного понятия «сквозные цифровые технологии». Под него можно подложить любую технологию, где хоть раз появляется цифра. Следующий уровень это сами термины, в основном неустоявшиеся и неоднозначные. Если, например, «новые производственные технологии», «технологии беспроводной связи» и «большие данные» подразумевают смысловую конкретику по времени, технике или наборам данных, то «нейротехнологии» в общепринятое понимании [4] это «любые технологии, которые оказывают фундаментальное влияние на то, как люди понимают мозг и различные аспекты сознания, мыслительной деятельности, высших психических функций», а в понимании С.Шишкина [5], заведующего отделом Курчатовского комплекса НБИКС-технологий это «создание новых технологий на основе объединения возможностей интерфейса «мозг – компьютер» и других технологий, и, прежде всего, управления компьютером с помощью взгляда».

Системы распределённого реестра это не технология, а продукт технологий, главным образом блокчейн-технологии. Блокчейн (*block chain*) – буквально, цепь блоков, это технология, которая позволяет создавать распределённую в информационной сети многомерную *книгу* аналогичную бухгалтерской, которая существует в единственном экземпляре, но *все* страницы (блоки) которой хранятся у *всех* пользователей и разделяются между участниками посредством пиринговых сетей. Каждый блок имеет уникальный неизменяемый параметр идентификации – хэш-сумму. Для защиты хэш-сумм в блокчейн применяется два алгоритма – *Proof of Work* (PoW, доказательство работы) и *Proof of Stake* (PoS, доказательство владения). Все блоки расположены в определённой последовательности, изменение которой невозможно. В этой книге можно зарегистрировать любую информацию и/или любые действия, но внести подделать или внести изменения в записи невозможно, поскольку система в реальном времени сканирует страницы всех пользователей и не допускает несанкционированных изменений. Так в, основанных на технологии блокчейн, криптовалютах сохраняются данные об их объёме и всех транзакциях. Эта технология применима во многих сферах человеческой деятельности, в частности для создания распределённых реестров.

Ещё хуже обстоит дело с «сенсорикой» [6]. Сенсóрика (лат. *sensus*, «восприятие») – категория, описывающая непосредственное восприятие ощущений, внешних воздействий. В физиологии сенсорика – функция нервной системы, заключающаяся в восприятии раздражителей, выполняемая при помощи сенсорной системы. В аспектонике и соционике сенсорика – тип воспринимаемой человеком информации, обобщённое название для аспектов «белая сенсорика» (информация об ощущении) и «чёрная сенсорика» (информация о форме). В технике сенсорика – совокупность первичных преобразователей, сенсоров, преобразующих внешнее воздействие, являющееся контролируемым параметром, в удобный для обработки сигнал. Какой технологический смысл вложен в это понятие, остаётся только догадываться.

Можно понадеяться, что вовлечённые в программу передовые частные и государственные фирмы, корпорации, центры, НИИ, университеты, учёные и инженеры смогут осознать смысл и наполнить содержанием написанные слова. Тем более, что сроки, основные исполнители и ответственные уже прописаны в паспортах Программы и национальных проектов, утверждённых 24 декабря 2018г. Советом при президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам были утверждены паспорта Программы и национальных проектов:

- Нормативное регулирование цифровой среды, сроки реализации: 01.11.2018–31.12.2021. Руководитель проекта С.В.Шипов, заместитель министра экономического развития Российской Федерации.
 - Информационная инфраструктура, сроки реализации: 01.11.2018–31.12.2024. Руководитель проекта О.А. Иванов, заместитель министра цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

- Кадры для цифровой экономики, сроки реализации: 01.11.2018–31.12.2024. Руководитель проекта И.Э.Торосов, заместитель министра экономического развития Российской Федерации.
 - Информационная безопасность, сроки реализации: 01.11.2018–31.12.2024. Руководитель проекта А.В.Соколов, заместитель министра цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.
 - Цифровые технологии, сроки реализации: 01.11.2018–31.12.2024. Руководитель проекта Е.Ю.Кисляков, заместитель министра цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.
 - Цифровое государственное управление, срок реализации 01.11.2018–31.12.2024. Руководитель проекта М.В. Паршин, заместитель министра цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

Появились красивые картинки, в частности национального проекта цифровая экономика (рис. 1.):



Рис. 1. Цифровая Экономика

Определено финансирование. Курировать проект будет вице-премьер РФ Максим Акимов. Руководителем проекта назначен министр цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ Константин Носков, а администратором – его заместитель Евгений Кисляков. По утверждению К.Носкова: «Сейчас мы закладываем порядка 2 трлн. 1,08 трлн – это дополнительные бюджетные средства, и рассчитываем как минимум на такую же сумму по внебюджетным источникам.» [7]. В сумме – больше 2-х триллионов.

В работу по пяти из девяти сквозных технологий включились научные и образовательные учреждения. Исполнителями выбраны: по системам распределённого реестра – НИПС (концерн «Автоматика»); по квантовым технологиям – МИСиС; по новым производственным технологиям – СПбПУ; по технологиям виртуальной и дополненной реальностей – ДВФУ; по робототехнике – Университет Иннополис. Остальные четыре технологии достались двум крупным госкомпаниям. Ростех получил «большие данные», «технологии беспроводной связи» и «промышленный интернет». «Искусственный интеллект» достался Сбербанку (!).

Здесь нужно отметить проблему различия целевых функций у науки/образования и промышленности/бизнеса. Задачей учёного/преподавателя является получение новых знаний и/или их носителей посредством оптимального расходования полученных средств. Задача бизнесмена/промышленника получить максимальную прибыль, оптимально используя знания и потенциал их носителей. Совмещение разнородных целей и задач приводит к недопониманию и противоречиям, разрушающим общее дело, особенно если в него вмешивается политика.

Здесь и возможны опасности чреватые новыми «Чернобылями». Техническая специфика угроз связанных с несовершенством операционных систем и сетевых технологий может привести к хакерским атакам, которые приведут к крупномасштабным авариям и катастрофам в энергетических системах, химических и ядерных производствах. Подобного рода опасности достаточно серьёзно осознаются (даже, как третья мировая война) и начинают учитываться правящими элитами Запада.

Определённый интерес представляет включение в программу АНО «Цифровая экономика», которая «создана в целях предоставления услуг в сфере развития цифровой экономики в Российской Федерации, в том числе путём поддержки общественно значимых проектов и инициатив в указанной сфере, а также координации взаимодействия между бизнес-сообществом в сфере цифровой экономики, научно-образовательными организациями, иными сообществами и органами государственной власти». АНО «Цифровая экономика» декларирует себя как площадку «для диалога бизнеса и государства» во взаимодействии с бизнес-, научно-образовательными и иными сообществами осуществляющая мониторинг развития цифровой экономики и цифровых технологий, формирование форсайтов и прогнозов развития цифровой экономики и цифровых технологий, а также подготовку предложений по основным направлениям развития цифровой экономики и поддержки «стартапов» и субъектов малого и среднего предпринимательства в области разработки и внедрения цифровых технологий.

Такой диалог может быть весьма ценным в деле преодоления расхождения в целях, задачах и методах между научными институтами и бизнесом, поможет их объединению в единую систему. В противном случае научные институты опишут хорошим научным (или квазинаучным) языком какие исследования и разработки потребуются и сколько на это нужно потратить денег, однако затрудняются предложить реальный механизм их возврата с прибылью в экономику страны. С другой стороны, практики из госкорпораций и бизнес-структур распишут, на какие проекты кому и сколько нужно потратить, для получения прибыли, но вклад таких проектов в решение задачи создания и развития цифровых технологий представляется сомнительным.

Пример решения этой задачи показал Новосибирский институт программных систем, выигравший конкурс на создание дорожной карты по блокчейну. НИПС – лидирующий научный институт в России в развитии

технологий распределённого реестра, причём не только в научной, но и в технологической части. Институт разработал прикладную платформу PREMIS для создания АСУ на основе распределённых реестров для автоматизации работ с имущественным комплексом, нормативно-справочной информацией, финансами, корпоративными данными и проч. После подведения итогов конкурса НИПС предложил сотрудничество по подготовке дорожной карты по блокчейну созданной российскими инженерами международной компании Waves, которая заняла второе место. Эта компания построила самую быструю в мире открытую блокчейн-сеть и запустила проект Vostok по разработке закрытой блокчейн-платформы для крупных корпораций и государственных органов. Waves сотрудничает в рамках этого проекта с крупнейшими компаниями страны, такими как Сбербанк, ВЭБ, «Ростех» и «Трансмаш холдинг». Представитель госкорпорации «Ростех» так объясняет преимущества сотрудничества Waves и НИПС: – «Поскольку в разработке дорожной карты необходимо учитывать не только научные достижения, но и тенденции мирового рынка и запросы бизнеса, выделение субтехнологий и их составных частей, потребностей отраслей и компаний-лидеров, НИПС будет вести подготовку дорожной карты по блокчейну вместе с компанией Waves, разработчиком одноименной блокчейн-платформы». Waves, со своей стороны планирует использовать «работать с компанией из контура «Ростеха» над созданием дорожной карты в области технологий распределённого реестра и предложить свою экспертизу в этом вопросе, особенно с учётом накопленных знаний, в том числе в рамках работы над проектом Vostok».

Этот опыт объединения усилий может быть примером для других операторов создания дорожных карт. В конкурсе по квантовым технологиям занявшие первое (МИСиС) и второе (концерн «Автоматика») места, в робототехнике занявший первое место «Университет Иннополис» и Сбербанк (второе место). Национальному центру информатизации может пригодиться помочь того же НИПСа, уступившего ему в конкурсе на написание дорожной карты по промышленному интернету. Победившему в конкурсе Сбербанку полезно было бы объединить усилия в работе над дорожной картой по искусственному интеллекту с ФИЦ «Информатика и управление» РАН занявшим второе место и так далее.

Итак, вроде бы, всё обдумано и осознано. Однако следует отметить некоторые нестыковки в сроках и странности в наименованиях.

7 мая 2018 года, в день своей инаугурации, президент РФ Владимир Путин подписал указ "О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года". Перед правительством РФ была поставлена задача достижения девяти национальных целей развития страны

После издания «нового майского» указа президента 2018 года о национальных программах, планы мероприятий, показатели и другие характеристики федеральных проектов (в «старой» программе они назывались направлениями) были определены практически заново.

Минкомсвязи России было поручено подготовить и внести в правительство проект распоряжения правительства об отмене распоряжения правительства от 28 июля 2017 г. №1632-р (Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации»). Премьер-министр РФ Дмитрий Медведев подписал распоряжение, согласно которому утверждённая в июле 2017 года программа "Цифровая экономика Российской Федерации" признана утратившей силу. Как сообщила пресс-служба кабмина, документ подписан 12 февраля 2019 года. Документ подготовлен во исполнение решения правительственной комиссии по цифровому развитию, заседание которой прошло в конце декабря 2018 года.

Хорошее начало, но только это не совсем начало, если обратить внимание на пункт 5-й указа –

5. Признать утратившей силу Стратегию развития информационного общества в Российской Федерации, утвержденную Президентом Российской Федерации 7 февраля 2008 г. N Пр-212 [8].

Оказывается, всё это уже было программы, структуры, деньги. И что? Всё начинается сначала. Поскольку ничего не ново под Луной, предыдущие попытки цифровизации (ОГАС, АСУ ТП и т.д.), их положительные и провальные результаты нужно изложить в отдельной публикации.

III. НЕОСОЗНАННАЯ НЕИЗБЕЖНОСТЬ

Но вот явились к нам они — сказали: "Здрасте!"
Мы их не ждали, а они уже пришли...

В.Высоцкий

Планы рушатся, программы отменяются, деньги исчезают, но процесс идёт. Государство не раз пыталось подступиться к решению проблемы. Последний Прогноз научно-технологического развития России до 2030 года был принят в 2014 году и определил перспективные рынки, продуктовые группы и потенциальные области спроса на российские инновационные технологии и разработки. Однако государство (включая фундаментальную науку) и рынки существуют отдельно друг от друга. Преодолеть пропасть между наукой и рынком пока не удается. В рамках национальной программы «Цифровая экономика» правительство определило девять ключевых технологий, каждая из которых способна полностью поменять правила игры сразу в нескольких отраслях экономики. По каждой из них были написаны дорожные карты. Но остается взаимное непонимание и дисбаланс между наукой и бизнесом. Научные институты пишут прекрасным академическим языком как государству потратить деньги на исследования, но затрудняются объяснить, как эти деньги вернутся в экономику страны. Бизнесмены из Сбербанка и «Ростеха» могут предложить сколько нужно потратить на гарантированные получение прибыли конкретные проекты, но врядли могут гарантировать существенное развитие самих технологий.

Простой пример решения этой задачи показал Новосибирский институт программных систем, выигравший конкурс и ставший оператором создания дорожной карты по блокчейну. НИПС – лидирующий научный инсти-

тут в России в части развития технологий распределённого реестра. Нельзя сказать, что компетенции НИПС сугубо научные, так институт разработал платформу PREMIS для создания систем управления на основе распределённых реестров, которые помогут организациям автоматизировать работу с имущественным комплексом, интеллектуальной собственностью, нормативно-справочной информацией, финансами, корпоративными данными. Однако в России есть команды, бизнес-опыт которых в блокчейне больше. Так, международная компания Waves, созданная российскими инженерами, построила самую быструю в мире открытую блокчейн-систему. Кроме того, команда Waves запустила проект Vostok по созданию закрытой блокчейн-платформы для крупных корпораций и государственных органов. В рамках этого проекта она сотрудничает с крупнейшими компаниями страны, такими как Сбербанк, ВЭБ, «Трансмашхолдинг» и тот же «Ростех». То есть знают запросы «крупняка» к технологии. Компания также участвовала в конкурсе и заняла в нем второе место после НИПС. Логично, что сразу после подведения итогов конкурса НИПС и Waves объявили, что будут вести подготовку дорожной карты по блокчейну вместе. Этот опыт может быть использован и другими операторами создания дорожных карт. Например, в квантовых технологиях второе место после МИСиСа занял концерн «Автоматика», который также может быть привлечен к работе над дорожной картой, а в робототехнике Иннополису вполне мог бы помочь Сбербанк, также пришедший вторым по итогам конкурса. И наоборот, в работе над дорожной картой по искусственно интеллектуальному концепту победившему в конкурсе Сбербанку вполне мог бы помочь занявший второе место Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, а Национальному центру информатизации может пригодиться помочь того же НИПСа, уступившего ему в конкурсе на написание дорожной карты по промышленному интернету.

В последние годы искусственный интеллект (ИИ) стал своего рода мейнстримом – каждая отрасль ищет свой сценарий применения перспективной технологии. ИИ оптимизирует логистику, интеллектуальные советники помогают врачам составить индивидуальный план лечения, в крупных городах ИИ контролирует трафик.

Искусственный интеллект позволяет решать предельно широкий список задач. Он применяется в самых разных отраслях – от финансов и связи до ритейла и медицины. С его помощью компании добиваются увеличения прибыли и уменьшения издержек, он делает бизнес-процессы эффективнее, помогает выстраивать коммуникацию с потребителем, совершенствует работу с данными и т.д. Объем мирового рынка ИИ измерить сложно, и даже разные исследовательские компании в силу разных методик оценки приводят разные цифры – от 100 млрд до 1,2 трлн долларов. Что касается отечественного рынка, то по итогам первого полугодия 2018 года его оценивали в 45,5 млрд рублей. Для сравнения – по итогам 2017 года он оценивался в 700 млн рублей, так что рост, можно сказать, стремительный. Эксперты предсказывают, что ежегодно мировой рынок ИИ будет увеличиваться почти на треть.

Сервисами таких технологических гигантов, как Facebook, Google и Microsoft, пользуются миллиарды людей в мире. Однако, по мнению внештатного научного сотрудника центра «Проект информационного общества» при Йельской школе права Майкла Квета [9], крупные американские ИТ-компании становятся монополистами отрасли в развивающихся странах Южного полушария. Способствуют этому их значительные финансовые и технические ресурсы. Он назвал поведение корпораций цифровым колониализмом, сравнив его с поведением европейских государств в XVI–XX веках, когда они захватывали и эксплуатировали экономически менее развитые народы. Помимо этого, корпорации акумулируют в своих руках данные о пользователях, которые в дальнейшем обрабатываются и используются ими в коммерческих целях.

У более бедных стран нет экономических возможностей создавать свои компании в сфере высоких технологий, которые смогли бы конкурировать с крупными корпорациями Кремниевой долины. В странах Южной Африки Google и Facebook доминируют на рынке онлайн-рекламы, вытесняя местных игроков медиарынка. В этом, по мнению автора статьи, и заключается характерная черта цифрового колониализма. Он развивает технологическую экосистему, целью которой является получение прибыли. Помимо этого, Google благодаря многочисленным сервисам обладает огромным массивом данных о пользователях по всему миру. Крупнейшая социальная сеть Facebook функционирует как «информационный посредник» между пользователями. Чтобы поделиться информацией или фотографией со своими друзьями, их необходимо сначала загрузить в Facebook.

Анализируя запросы пользователей в поисковой системе Google или персональные данные в Facebook о возрасте, семейном положении и увлечениях, ИТ-компании адресуют рекламу товаров и услуг конкретной целевой аудитории. Такие же претензии предъявляются и лидеру на рынке программного обеспечения – компании Microsoft. Бывший сотрудник ЦРУ и АНБ Эдвард Сноуден заявлял потом, что компания позволяла американским спецслужбам следить за пользователями своих программ Outlook, Skype и SkyDrive. Помимо этого, в прессе появлялись материалы о том, как компания собирает информацию о пользователях посредством программы Windows.

Важность искусственного интеллекта и прочих современных технологий хорошо понимают и на высшем государственном уровне в странах, которые претендуют на звание технологических держав. Администрация Барака Обамы еще в 2016 году выпустила несколько докладов о будущем ИИ, а в 2018 году эту гонку офици-

ально вступил Китай – заявив о задаче к 2030 году довести объем рынка технологий ИИ до \$150 млрд. В России цифровизация тоже стала государственной задачей, но развитие силами одного государства невозможно. Фактически, цифровизация, как в свое время Интернет осуществляется неопределенным кругом лиц, организаций и государств. При этом детерминировано направлять и управлять развитием процесса не в состоянии ни государство, ни политики, ни чиновники, ни бизнесмены. Можно утверждать, что здесь работают неотвратимые механизмы Эволюции сложных больших систем.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

...но время и случай для всех них.
Еккл.3,1; Лук.12,25

Основной явный игрок цифровизации – это бизнес. Средства, которые вкладывает бизнес, входящий и не входящий в государственные программы, в разы пре-восходит максимально возможные государственные расходы. Объемы и темпы инвестирования в цифровизацию будут стремительно расти. Планировать и управлять этим невозможно. Цифровизация задаёт общую архитектурную логику взаимодействия людей, государства и бизнеса в цифровой экономике. В том числе логику так называемых цифровых профилей. И общая логика – это правильно не только с точки зрения обеспечения безопасности, но и с точки зрения обеспечения обмена данными, как между государственными органами, так и между бизнесом и гражданами.

Цифровизация – это объективный фактор, а не пожелание людей, бизнесменов, политиков или государства. Не вовлечённый в цифровизацию субъект обречён. Что же будут делать политики? Ответ давно известен – Если движение нельзя остановить, его нужно возглавить!

Теперь, пожалуй, можно сделать основной вывод из представленного выше – цифровизация неизбежна, но для осознания и принятия этого еще потребуются очень многие усилия человеческого разума.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. PowerPoint Presentation (tufts.edu).
2. Место России в мировых рейтингах цифровизации (fa.ru).
3. PowerPoint Presentation (tufts.edu).
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
5. <https://intalent.pro/interview sergey-shishkin-o-budushchem-neyrotehnologiy-i-interfeysah-mozg-kompyuter.html>.
6. <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/681778>.
7. (http://government.ru/dep_news/34005/).
8. Стратегия развития (digital.gov.ru).
9. Digital colonialism is threatening the Global South | Science and Technology | Al Jazeera.

Реализация способов управления и обработки данных в фотоприемных устройствах на основе КМОП-матриц научного класса

Ардиланов Валерий Иванович
Лаборатория перспективных разработок
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
valeruy@sao.ru

Мурzin Валерий Александрович
Лаборатория перспективных разработок
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
vamur@sao.ru

Афанасьева Ирина Викторовна
Лаборатория перспективных разработок
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
riv@sao.ru

Иващенко Николай Григорьевич
Лаборатория перспективных разработок
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
ivanick@sao.ru

Притыченко Максим Александрович
Лаборатория перспективных разработок
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
rma@sao.ru

Васюк Игорь Владимирович
Лаборатория перспективных разработок
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН
Нижний Архыз, Россия
igorem@gmail.com

Аннотация. В работе описан способ построения быстродействующих систем регистрации изображений на основе широкоформатных малошумящих КМОП-матриц видимого оптического диапазона. Определены задачи и предложено обоснование способов их решения в процессе построения контроллеров и создания управляющего программного обеспечения. Представлены опытные образцы и технические характеристики двух фотоприемных устройств. Созданные устройства могут применяться в задачах получения изображений быстропеременных астрономических объектов и панорамных обзорах небесной сферы.

Annotation. This paper describes a method to construct a high-speed image registration system based on a large-format low-noise CMOS sensor of the visible spectrum. We are defining problem sets and present a justification of their solution approaches while building controllers and creating control software. Two prototypes and their technical characteristics are presented. The resulting devices can be utilized to obtain images of fast-pulsating astronomical objects and building panoramic surveys of the celestial sphere.

Ключевые слова: КМОП-матрицы, КМОП ФПУ, контроллер КМОП ФПУ, высокоскоростная передача цифровых видеоданных.

Keywords: CMOS imagers, CMOS camera, CMOS camera controller, high-speed digital image transmitting.

I. ВВЕДЕНИЕ

Фотоприемные устройства (ФПУ) для научных применений предназначены для регистрации преимущественно очень слабых световых потоков, преобразования их в видеосигнал посредством твердотельного матричного приемника изображения (детектора) и формирования цифровых изображений с последующим вводом их в управляющий компьютер [1].

До недавнего времени бесспорным лидером в задачах регистрации слабых астрономических объектов видимого оптического диапазона были ПЗС-матрицы (фотоприемники на основе приборов с зарядовой связью) вследствие их высокой чувствительности, низкого шума считывания и отсутствия геометрического шума. С развитием технологий характеристики КМОП-матриц (фотоприемники на основе комплементарных структур «металл-оксид-проводник») неуклонно приближались к ПЗС. Современные КМОП-матрицы, построенные по схемам 4-, 5-транзисторных преобразователей «заряд-напряжение» по ключевым показателям сравнялись с ПЗС. В то же время частота считывания кадров у них выше в десятки раз. При использовании КМОП-матриц появляется возможность отказаться от медленного механического затвора, используя электронный затвор. Тем самым существенно возрастает временная и координатная точность регистрации. Обладая такими преимуществами, КМОП-матрицы позволяют более эффективно решать многие задачи оптической астрономии.

II. КМОП ФПУ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

A. Структура фотоприемного устройства

Обобщенная структурная схема КМОП ФПУ приведена на рис. 1.

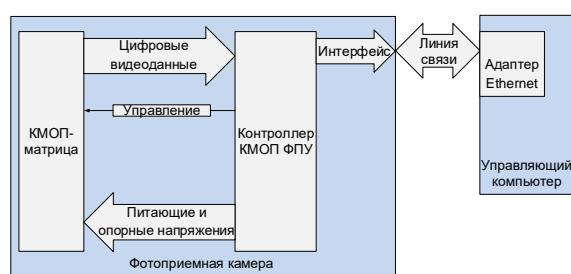


Рис. 1. Структурная схема КМОП ФПУ

Управление работой КМОП ФПУ осуществляется от компьютера с установленным программным обеспечением. Наблюдатель производит задание режимов работы ФПУ, обзор параметров телеметрии, установку рабочей температуры детектора, накопление и считывание изображения в компьютер, обработку и сохранение изображения на жесткий диск.

Интерфейс связи фотоприемной камеры с управляющим компьютером реализован в контроллере КМОП ФПУ. Контроллер принимает через интерфейс команды, осуществляет управление КМОП-матрицей, обрабатывает и направляет полученные цифровые видеоданные и телеметрическую информацию в компьютер. Контроллер генерирует необходимые для работы детектора питающие и опорные напряжения, непрерывно обеспечивает стабилизацию его рабочей температуры.

B. Управление КМОП-матрицей

В настоящее время существуют десятки фирм, производящих КМОП-матрицы для различных областей науки и техники. Из числа производителей детекторов научного класса можно выделить двух мировых лидеров: Teledyne E2V (Великобритания) и GPixel Inc (КНР). Коммерчески доступны на данный момент для астрономических применений КМОП-приемники с засветкой с обратной стороны типа CIS113 [2] фирмы Teledyne E2V, GSense4040 [3] и GSense6060BSI [4] фирмы GPixel.

Приборы серии GSense доступны для приобретения, имеют существенно меньшую цену и более просты для реализации управления ими при сравнимых характеристиках с прибором CIS113, поэтому в данной разработке предпочтение было отдано им.

В КМОП-матрицах преобразование накопленного заряда в напряжение происходит непосредственно в ячейке изображения, и затем по коммутируемым шинам передается к выходу. Поэтому управление такими приборами требует большого количества сигналов управления.

Рассмотрим структурную схему КМОП-матрицы GSense4040, приведенную на рис. 2. Структура прибора GSense6060BSI имеет аналогичный вид, отличаясь в большую сторону количеством каналов данных, управляющих и опорных напряжений.

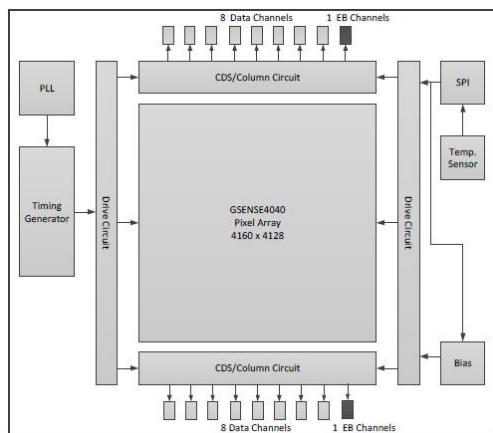


Рис. 2. Структурная схема КМОП-матрицы GSense4040

Матрица имеет два основных режима работы: Rolling Standart и Rolling HDR. В первом режиме при одновременном считывании 9 верхних и 9 нижних каналов фор-

мируется цифровое изображение, имеющее глубину квантования 12 бит с малым или большим усилением в кадре. Во втором режиме верхние и нижние каналы также считаются одновременно, но с различным усилением. В этом режиме, путем объединения двух полученных изображений, может быть сформировано цифровое изображение с динамическим диапазоном 90 дБ.

Для функционирования GSense4040 необходимы следующие управляющие сигналы:

- 5 питающих и 14 опорных напряжений с управляемым моментом включения/отключения;
- 3-канальный SPI-интерфейс для программирования управляющего регистра матрицы;
- 16-канальная шина управления выбором адреса активной строки матрицы;
- 24 сигнала временной развертки матрицы;
- входной сигнал тактовой частоты.

Процесс получения изображения в КМОП-матрице включает следующие фазы: сброс, накопление и считывание. Все три фазы применяются к каждой строке матрицы, и при считывании целого кадра выполняются последовательно от первой до последней строки. Такой режим называется «считывание со скользящим затвором», при котором каждая строка имеет одинаковое время накопления заряда. Другой режим, называемый «глобальный сброс», предусматривает сброс заряда для всех строк, далее фаза накопления, и затем последовательное построчное считывание, при этом каждая последующая строка имеет дополнительное время накопления, равное сумме периодов времени, затраченных на считывание предшествующих строк в кадре.

Таким образом при управлении КМОП-матрицей должна быть запущена определенная последовательность сигналов временной развертки, соответствующая текущей фазе, совместно с определенным адресом строки, к которой эта фаза применяется.

III. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ КМОП ФПУ

A. Выбор интерфейса связи камеры с управляющим компьютером

Основные требования к интерфейсу: производительность от 10 до 40 Гбит/с, длина линии связи не менее 100 м и обеспечение развязки электрических земель. Таким требованиям вполне удовлетворяют оптоволоконные линии связи.

В настоящее время существует несколько промышленных стандартов для высокоскоростного обмена с фотоприемными устройствами. Эти стандарты разработаны под эгидой международной ассоциации A3 Vision & Imaging [5]. Использование стандартного интерфейса является более предпочтительным решением. Основные кандидаты, имеющие необходимую производительность и длину оптоволоконной линии связи – это стандарты GigE Vision, Camera Link HS и CoaXpress. Однако использование данных стандартов влечет за собой значительные финансовые расходы, которые не окупаются при малых тиражах изделий, к которым относятся фотоприемники.

приемные устройства научного класса. Эти расходы связаны с ежегодными платежами правообладателю стандарта, сертификацией разработанного устройства и покупкой дорогостоящих специфических фреймграбберов и преобразователей сигнала из электрического в оптический (для стандартов Camera Link HS и CoaXpress). Стандарт GigE Vision более предпочтителен, так как использует широко распространенные адаптеры стандарта Ethernet, но и он требует платежей. Кроме того, стандарт GigE Vision является сетевым, что избыточно для данного проекта, в котором достаточна связь типа «точка-точка».

Приемлемым решением для настоящего исследования является использование стандартного сетевого адаптера на стороне компьютера и специально разработанного приемо-передающего модуля на стороне ФПУ, реализация минимального необходимого подмножества функций стандарта GigE Vision и обмен пакетами Ethernet. Для фотодетектора GSense4040 контроллер реализует канал производительностью 10 Гбит/с, а для GSense6060BSI – 40 Гбит/с.

B. Программная модель ФПУ

В целом, контроллер для управляющей программы представляется как набор адресуемых регистров и памяти. Часть из этих регистров и памяти доступна для записи и чтения, а часть только для записи, или только для чтения.

Контроллер имеет 32-разрядное адресное пространство с байтовой адресацией. Протокол обмена с контроллером предполагает обмен пакетами с границей по 32-разрядным словам. Поэтому адресное пространство контроллера также разбито на 32-разрядные слова. Все регистры и память в устройствах контроллера имеют 32-битный формат. Система адресации позволяет адресовать конкретный регистр в контроллере. Физически за адресом отдельного регистра может также стоять массив памяти, но доступ к нему происходит только через этот адрес.

В пространстве адресов выделяются отдельные адреса для регистров команд, управления и состояния, посредством которых происходит управление режимами работы контроллера.

Для обмена между управляющей программой и контроллером КМОП ФПУ используется модифицированное подмножество протоколов стандарта GigE Vision версии 2.0. Обмен данными между управляющим компьютером и контроллером происходит в формате Ethernet IEEE 802.3, общая длина данных должна быть кратна 32 битам. Каждый пакет содержит заголовок, включающий заголовки разных уровней сетевого стека – Ethernet, IP, UDP и GigE Vision.

Реализованы каналы двух типов – канал управления и видеоканалы. Канал управления строится на основе GigE Vision Control Protocol (GVCP). Устройство поддерживает один канал управления (Primary Control Channel). Длина пакета для канала управления не превышает 576 байт. В канале реализовано следующее подмножество команд: чтение и запись регистров, чтение и запись памяти. На каждую принятую команду возвращается сообщение с подтверждением принятия или результатом выполнения. Таким образом, обмен пакетами в канале происходит в обоих направлениях.

Видеоканал построен на основе GigE Vision Streaming Protocol (GVSP) и представляет собой поток видеоданных из контроллера во внутреннюю память компьютера. Длина пакета видеоканала увеличена, и может достигать 4234 байт (jumbo-пакет). Передача jumbo-пакетов идет только в направлении от ФПУ к управляющему компьютеру.

Контроллер может содержать несколько видеоканалов. Для фотодетектора GSense4040 контроллер реализует девять каналов видеоданных по протоколу GVSP. Для фотодетектора GSense6060BSI контроллер содержит 25 каналов видеоданных. Каждый видеоканал передает данные только для своей части полного кадра (субкадра).

C. Выбор способа управления КМОП-фотодетектором

В целях миниатюризации фотоприемных камер и минимизации затрат контроллер ФПУ предпочтительно строить на основе одной сверхбольшой интегральной схемы (СБИС).

В настоящее время для КМОП ФПУ возможны три подхода к реализации управления фотодетектором, обработки и сбора данных:

- микропрограммная реализация на основе микропроцессоров или процессоров обработки сигналов (процессоры ЦОС, DSP);
- схемная реализация на основе программируемых логических матриц (ПЛИС, FPGA);
- смешанная (микропрограммная + схемная) реализация на основе систем на кристалле (СнК, SoC).

К явным преимуществам микропрограммного подхода следует отнести относительную легкость реализации очень сложных алгоритмов цифровой обработки видеоданных и имплементации современных сетевых протоколов высокого уровня для обмена с камерой (таких как GigE Vision). Однако микропроцессоры плохо подходят для задач формирования синхронных управляющих сигналов детектора с высоким временным разрешением, первичной синхронизации и детектирования потока многоканальных данных.

К достоинствам схемной реализации на основе ПЛИС, наоборот, относятся возможность сформировать набор синхронных управляющих сигналов с высоким временным разрешением (на уровне наносекунд) и возможность приема и синхронизации цифрового потока от нескольких десятков видеоканалов. С задачей многоканальной обработки цифровых видеосигналов ПЛИС справляются легко. Основная трудность в данном случае – реализовать протокол обмена высокого уровня с управляющим компьютером.

Третий подход – на основе системы на кристалле, которая включает в себя как микропроцессор, так и программируемую логику, – на первый взгляд, должен идеально подходить к данной задаче. Но и здесь возникает одна проблема. Современные фотодетекторы научного класса обладают очень высокой чувствительностью – шум считывания составляет порядка нескольких электрон, что соответствует нескольким микровольтам в видеосигнале.

Для достижения такого низкого шума считывания требуется жестко синхронизировать все процессы управления детектором, поскольку все несинхронные процессы вызывают асинхронные помехи на изображении, которые невозможно устранить. Сложность синхронизации выполнения микропрограмм и процессов в логических схемах составляет слабую сторону данного подхода.

С учетом вышесказанного был выбран схемный метод построения системы управления КМОП ФПУ на основе ПЛИС высокой степени интеграции. При этом, однако, пришлось решить проблему схемной реализации протокола обмена высокого уровня с управляющим компьютером.

D. Реализация управления КМОП-фотодетектором

Рассмотрим реализацию контроллера КМОП ФПУ для фотодетектора типа GSense4040.

ПЛИС контроллера КМОП ФПУ (рис. 3) выполняет следующие основные задачи:

- принимает команды от управляющего компьютера;
- формирует управляющие сигналы и сигналы временной развертки для КМОП-фотодетектора;
- принимает и обрабатывает видеоданные, приходящие из фотодетектора по нескольким цифровым видеоканалам;
- формирует и посылает видеоданные и данные telemetry в управляющий компьютер.

Связь с управляющим компьютером происходит через оптоволоконный интерфейс стандарта Ethernet 10 Гбит. Для этого в ПЛИС реализован интерфейсный блок, включающий три нижних уровня интерфейсного стека – MAC, PCS и PMA [6]. На более высоком уровне интерфейсного стека (уровне приложений) используется GigE Vision. Блок арбитра пакетов осуществляет приоритетное объединение потоков данных от канала управления и видеопроцессора.

Так как адресация в программной модели имеет 32-битный формат, а интерфейс имеет 64-битную ширину, предусмотрены блоки конвертеров ширины потоков данных.

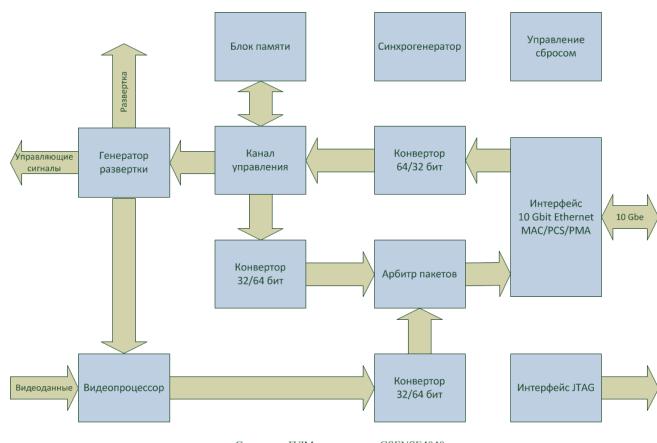


Рис. 3. Структурная схема управляющей ПЛИС для контроллера КМОП ФПУ

Канал управления декодирует и выполняет команды записи и чтения регистров и памяти, приходящие из управляющего компьютера, контроллера, формирует ответные сообщения, выполняет запуск временных последовательностей в генераторе развертки. В блоке памяти хранятся данные, управляющие работой контроллера.

Генератор развертки формирует набор из двух десятков сигналов развертки и 15-битный адрес строки для различных режимов сброса, накопления и считывания фотодетектора (скользящий затвор (rolling shutter), глобальный затвор (global shutter), бининг (binning)). Временное разрешение сигналов развертки составляет порядка 25 нс.

Режимы и параметры накопления и считывания должны быть записаны также непосредственно в фотодетектор посредством специальной трехпроводной последовательной линии связи.

Формируемые детектором видеоданные приходят в цифровом виде по 18 последовательным дифференциальным каналам с частотой до 625 Мбит/с/канал. Для правильного приема видеоданных выполняется специальная процедура выравнивания фронтов цифровых данных каналов путем внесения дополнительной требуемой задержки в каждом канале. Кроме этого, требуется выполнить выравнивание границ 12-битных слов, приходящих из каждого канала.

Видеопроцессор контроллера КМОП ФПУ может формировать кадр либо с малым усиливанием (low gain, LG), либо с большим усиливанием (high gain, HG), либо комбинированный кадр (LG + HG) с большим динамическим диапазоном. Всего на выходе формируется 9 независимых потоков данных, связанных с логическими видеоканалами протокола GigE Vision. Пакеты в процессе передачи буферизуются и мультиплексируются в один поток видеоданных.

Схема ПЛИС контроллера КМОП ФПУ на основе фотодетектора типа GSense6060BSI имеет следующие отличия:

- имеется 25 верхних и 25 нижних входных цифровых линий видеоданных, которые формируют 25 логических каналов;
- добавлен режим 14-битного считывания, требующий собственной временной развертки;
- производительность интерфейса составляет 40 Гбит/с, и ширина шины интерфейса увеличена до 256 бит.

Параметры накопления и считывания, устанавливаемые программой:

- вид считывания (одиночный, непрерывный);
- режим считывания детектора (rolling shutter, global shutter);
- бининг (1x1, 2x2);
- длительность экспозиции;
- координаты и размер окна (нескольких окон) для сброса;

- координаты и размер окна (нескольких окон) для считывания;
- конфигурация видеовыходов (LG, HG, LG+HG);
- усиление для видеовыходов LG и HG;
- порог переключения каналов (для режима LG+HG);
- сдвиг уровня черного для видеовыходов LG и HG;
- синхронизация начала накопления от внешнего сигнала;
- эмulation видеоканалов.

Параметры записываются управляющей программой в соответствующие регистры контроллера и начинают действовать в момент запуска последовательности считывания по команде «Старт».

E. Проектирование и реализация управляющего программного обеспечения для КМОП ФПУ

Основные задачи программного обеспечения – управление фотоприемным устройством и получение от него астрономических данных (изображений), а также эффективное использование всех возможностей фотоприемника [7].

Проектирование и реализация программного обеспечения выполнено с использованием методики, описанной в работе [8].

При разработке данного программного комплекса учитывались следующие характеристики контроллеров КМОП ФПУ (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЛЕРОВ КМОП-ФПУ

Характеристика	Контроллер КМОП ФПУ	
	GSense4040	GSense6060 BSI
Размер кадра, пиксели	4160 × 4128	6144 × 6144
Объем информации в 1 кадре, МБ	32,8	72
Частота кадров, кадр/с	24	44
Скорость считывания, ГБ/с	0,8	3,4
Количество информации за 1 ч. непрерывного считывания, ТБ	2,8	11,9
Число видеоканалов	9	25
Тип интерфейсного адаптера	Intel X520-1	Intel XL710
Протокол обмена верхнего уровня	GigE Vision 2.1	
Протокол обмена нижнего уровня	Ethernet IEEE 802.3	

Основные этапы процесса астрономических наблюдений с КМОП ФПУ:

- 1) *Connect* – установка связи с камерой.
- 2) *Setup* – задание параметров наблюдений и режимов камеры.
- 3) *Start* – старт наблюдений.
- 4) *Integrating* – накопление светового заряда в фотоприемнике в течение заданного времени.
- 5) *Readout* – считывание данных и передача их в виртуальную память компьютера.

6) *Writing* – сохранение изображения в дисковой памяти компьютера в формате FITS [9].

7) *Image Preview* – визуализация данных на экране монитора.

8) *Stop* – остановка наблюдений.

По команде «Старт» фотоприемное устройство выполняет накопление, затем передает в интерфейсный адаптер изображение заданного размера, формируя данные от каждого видеоканала в виде Ethernet-пакетов. Программное обеспечение на стороне компьютера принимает пакеты, извлекает из них данные, сортирует данные по номеру канала и номеру строки, затем формирует полный кадр с изображением и визуализирует его. Затем кадр записывается на жесткий диск. По команде «Стоп» устройство прекращает передачу данных.

В состав системы входят взаимодействующие компоненты, реализованные в виде активных объектов. Сравнительная характеристика по составу компонентов программного обеспечения для контроллеров на основе GSense4040 и GSense6060BSI приведена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. СОСТАВ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Программный компонент	Программный комплекс	
	GSense4040	GSense6060 BSI
Обеспечение процесса наблюдений	1	1
Прием пакетов и извлечение данных	1	1
Сортировка данных и формирование кадра	2	4
Запись кадра	2	4
Визуализация изображения	1	1

Компоненты выполняются параллельно, в отдельных потоках исполнения. Обмен информацией между компонентами происходит с помощью событий и «банков данных». Чтобы не тратить время на резервирование и освобождение памяти для блоков данных, при старте программы резервирует буфер в виртуальной памяти, и выделяет память под блоки из буфера. Блоки данных перемещаются между банками данных посредством указателей, избегая избыточного копирования.

В состав каждого программного комплекса входят: программа управления ФПУ в интерактивном режиме, программа управления ФПУ из командной строки и набор программных компонентов для разработчика в виде отдельной динамически подключаемой библиотеки. Программное обеспечение реализовано на языке программирования C++ в интегрированной среде Microsoft Visual Studio 2019 с использованием кроссплатформенного инструментария разработчика QT v5.11.3.

F. Требования к управляющему компьютеру

Ввод практически непрерывного интенсивного потока астрономических данных в компьютерную систему на протяжении многих часов наблюдений требует выбора наиболее эффективной архитектуры для реализации необходимой пропускной способности: не менее 0,8 ГБайт/с для контроллера на основе GSense4040, и 3,4 ГБайт/с для контроллера на основе GSense6060BSI (табл. 1).

В последние годы в компьютерных технологиях произошли качественные изменения, связанные с переходом от параллельных шин к скоростным последовательным шинам [10]. PCI Express (PCIe) практически вытеснила все параллельные шины, кроме PCI-X. Технология PCIe реализуется в различных системных платформах и обеспечивает высокую скорость передачи (табл. 3), которая будет достаточной, с учетом развития процессоров и подсистем ввода-вывода, по крайней мере, в течение следующих 10 лет. Существует несколько форм-факторов слотов PCIe, размер которых зависит от количества используемых линий. Например, шина, имеющая 16 линий, обозначается как PCIe x16. Пропускная способность платы PCIe x16 6.0 составит 126 Гбайт/с.

ТАБЛИЦА 3. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ШИНЫ PCIe

Версия PCIe	Год выпуска	Скорость передачи одной линии, Гб/с (гигатранзакций/с)	Пропускная способность одной линии, Гбайт/с
2.0	2007	5	0,50
3.0	2010	8	1,00
4.0	2017	16	1,97
5.0	2019	32	3,94
6.0	2021	64	7,88

Первые процессоры с поддержкой PCIe 4.0 на чипсете X570 были выпущены компанией AMD в 2019 г. В 2020 г. компания Intel выпустила процессоры на платформе Tiger Lake с контроллером шины PCIe 4.0. Однако Intel предоставляет всего четыре линии интерфейса PCIe 4.0, тогда как AMD располагает 24 линиями. Благодаря шине PCIe 4.0, скорость записи на твердотельные накопители с высокоскоростным интерфейсом M.2 может достигать 4,2 Гбайт/с (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. СРАВНЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

Название накопителя	Емкость, Тбайт	Чтение, Гбайт/с	Запись, Гбайт/с
Gigabyte AORUS	2,0	5,0	4,2
WD Ultrastar DC SN200	3,2	6,3	2,4
Samsung 970 Evo Plus	1,0	3,5	3,4
Transcend 220S	1,0	3,4	2,8
Patriot Viper VPN100	2,0	3,1	3,0

Таким образом, технология PCIe 4.0 обеспечивает надежное решение с требуемой пропускной способностью.

IV. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенного проектирования и последующих этапов разработки и изготовления был создан опытный образец ФПУ4040 на основе КМОП-матрицы GSense4040 (рис. 4) [11, 12].

Основные технические характеристики ФПУ4040:

- Размер кадра: 4160 x 4128 элементов.
- Время считывания кадра (9 каналов): 0,04 с.
- Шум считывания: 4,4 e⁻ для HG и 34 e⁻ для LG.



Рис. 4. Внешний вид ФПУ4040

- Квантовая эффективность: 74 % на длине волны 600 нм.
- Максимальная кадровая частота: 24 кадр/с.
- Динамический диапазон: 750 для HG и 2200 для LG.
- Рабочая температура матрицы: -25 °C.
- Габариты фотоприемной камеры: Ø135 x 240 мм.
- Вес камеры с блоком питания: 7 кг.

В настоящее время завершаются работы по сборке и наладке опытного образца ФПУ6060 на основе КМОП-матрицы научного класса GSense6060BSI с форматом кадра 6K x 6K.

Основные технические характеристики ФПУ6060:

- Размер кадра: 6144 x 6144 элементов.
- Время считывания кадра (25 каналов): 0,04 с.
- Шум считывания: 3,5 e⁻ для HG.
- Квантовая эффективность: 94 % на длине волны 580 нм.
- Максимальная кадровая частота: 26 кадр/с.
- Интерфейс ввода/вывода: Ethernet 40 Гбит/с.
- Габариты фотоприемной камеры: Ø200 x 170 мм.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ разработаны два фотоприемных устройства для астрономических наблюдений. Устройства специально оптимизированы для работы в данной области и имеют следующие преимущества:

- Герметичное исполнение корпуса камеры.
- Интерфейс связи обеспечивает управление ФПУ на большом удалении при сохранении максимальной кадровой частоты.
- Функционирование в широком диапазоне температур окружающей среды.
- Возможность работы в составе роботизированных телескопов.
- Привязка к системе единого времени.

К дополнительным преимуществам можно отнести невысокую цену устройства и доступность сервисного обслуживания.

Основная область применения ФПУ – панорамный обзор небесной сферы и получение изображений быстroppеременных астрономических объектов в составе быстрых телескопов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в рамках проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 1 ноября 2019 года №05.619.21.0016 (RFMEFI61919X0016) с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2021 годы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мурзин В.А., Маркелов С.В., Ардиланов В.И. [и др.]*. Астрономические ПЗС-системы для 6-метрового телескопа БТА (обзор) // Успехи прикладной физики. – 2016. – Т. 4, № 5. – С. 500–506.
2. CMOS image sensor GSense4040 / GPixel Inc. – URL: <https://gpixel.com/products/area-scan-en/gsense4040/> (дата обращения: 30.07.2021).
3. Scientific CMOS image sensor Gsense6060BSI / GPixel Inc. – URL: <https://gpixel.com/products/area-scan-en/gsense6060bsi/> (дата обращения: 30.07.2021).
4. CMOS scientific imager CIS113 / Teledyne E2V. – URL: <https://www.teledyne-e2v.com/markets/space/astronomy-imaging/cis113/> (дата обращения: 30.07.2021).
5. Vision Standards / Association for Advanced Automation (A3). – URL: <http://www.automate.org/a3-content/vision-standards> (дата обращения: 30.07.2021).
6. Виноградов В. Системное развитие быстродействующих коммутируемых сетей Ethernet // Современные технологии автоматизации. – 2009. – № 1. – С. 16-29.
7. Afanasieva I.V. Data acquisition and control system for high-performance large-area CCD systems // Astrophysical Bulletin. – 2015. – Vol. 70, No. 2. – P. 232–237. – DOI 10.1134/S1990341315020108.
8. Афанасьева И.В., Новиков Ф.А., Федорченко Л.Н. Методика построения событийно-управляемых программных систем с использованием языка спецификации CIAO // Труды СПИИРАН. – 2020. – Т. 19, № 3. – С. 481-514. – DOI 10.15622/sp.2020.19.3.1.
9. Pence W.D., Chiappetti L., Page C.G., Shaw R.A., and Stobie E. Definition of the Flexible Image Transport System (FITS), version 3.0. // Astronomy and Astrophysics. – 2010. – № 524. – P. A42.
10. Zhang F. History and Development of Bus. In: High-speed Serial Buses in Embedded Systems. – Springer, Singapore, 2020. – DOI 10.1007/978-981-15-1868-3_1.
11. Афанасьева И.В. Мурзин В.А., Ардиланов В.И. [и др.]. Высокоскоростное малошумящее фотоприемное устройство для наземных наблюдений объектов космического мусора // Всероссийская научная конференция «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы». Сборник трудов. Серия «Механика, управление и информатика». – М.: Институт космических исследований Российской академии наук, 2019. – С. 52-57. – DOI 10.21046/spacedebris2019-52-57.
12. Ardinanov V.I., Murzin V.A., Afanasieva I.V. [et al.]. Development of Large-Format Camera Systems Based on the Latest Generation Sensors for the 6-m Telescope // Ground-based astronomy in Russia. 21st century: Proceedings of the All-Russian Conference, Nizhny Arkhyz, 21–25.09.2020. – Nizhny Arkhyz: Special Astrophysical Observatory, 2020. – P. 115-118. – DOI 10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_115.

Поиск и исследование быстрых оптических транзиентов в широкоугольном мониторинге неба

Ляпсина Надежда Владимировна
Специальная астрофизическая
обсерватория
Российской академии наук
Нижний Архыз, Россия
nadezhda@inbox.ru

Иванов Евгений Александрович
Специальная астрофизическая
обсерватория
Российской академии наук,
АО “НПК “Системы прецизионного
приборостроения”
“Станция оптических наблюдений
“Архыз”
Нижний Архыз, Россия
bitman32@yandex.ru

Перков Алексей Викторович
АО “НПК “Системы прецизионного
приборостроения”
“Станция оптических наблюдений
“Архыз”
Нижний Архыз, Россия
pir@sao.ru

Бескин Григорий Меерович
Специальная астрофизическая
обсерватория
Российской академии наук,
Нижний Архыз, Россия
Казанский (Приволжский)
федеральный университет,
Казань Россия
gbeskin@mail.ru

Карпов Сергей Валентинович
Institute of Physics of the Czech
Academy of Sciences
Прага, Чехия
Специальная астрофизическая
обсерватория
Нижний Архыз, Россия
Российской академии наук,
Казанский (Приволжский)
федеральный университет,
Казань, Россия
karpov.sv@gmail.com

Сасюк Вячеслав Васильевич
Казанский (Приволжский)
федеральный университет,
Казань, Россия
slavik2001@mail.ru

Бирюков Антон Владимирович
Государственный астрономический
институт им. П.К. Штернберга МГУ,
Москва, Россия
Казанский (Приволжский)
федеральный университет,
Казань, Россия
ant.biryukov@gmail.com

Каткова Елена Валентиновна
АО “НПК “Системы прецизионного
приборостроения”
“Станция оптических наблюдений
“Архыз”
Нижний Архыз, Россия
elka.xyz@yandex.ru

Аннотация. В работе описывается 9-канальная система широкоугольного оптического мониторинга неба с субсекундным времененным разрешением Mini-MegaTORTORA (MMT-9). MMT-9 предназначена для регистрации и исследования нестационарных оптических объектов разных типов. Обсуждаются особенности конструкции прибора, его информационного обеспечения, режимы функционирования. Приводятся некоторые результаты наблюдений с MMT-9. Обсуждаются перспективы развития широкоугольного оптического мониторинга небесной сферы.

Annotation. The paper describes a 9-channel Mini-MegaTORTORA (MMT-9) wide-field optical sky monitoring system with subsecond temporal resolution. MMT-9 is designed for registration and investigation of non-stationary optical objects of various types. The design features of the device, its information support, and modes of operation are discussed. Some results of observations with MMT-9 are presented. Prospects for the development of wide-angle optical monitoring of the celestial sphere are discussed.

Ключевые слова: Оптический мониторинг, фотометрия, высокое временное разрешение, транзиенты, нестационарные объекты.

Key words: Optical monitoring, photometry, high temporal resolution, transients, non-stationary objects.

I ВВЕДЕНИЕ

Впервые проблему поиска и исследования быстропрерывенных во времени и пространстве оптических источников четко сформулировал Г. Бонди в 1970 г. [1], отмечив важность поисков нестационарных объектов неизвестной заранее локализации. Для их обнаружения и изучения необходимы широкоугольные инструменты (с полем зрения в сотни квадратных градусов), использующие детекторы как минимум субсекундного временного разрешения. (Последнее требование обусловлено малой длительностью и/или большими угловыми скоростями изучаемых явлений).

Соотношение этих характеристик, на наш взгляд, было оптимизировано в проекте широкогольной камеры с объективом относительно малого диаметра, электронно-оптическим преобразователем для эффективного укорачивания фокуса и быстрой малошумящей ПЗС-матрицей [2]. Наблюдения с первой версией прибора, FAVOR (FAst Variability Optical Registrator), созданного нами в САО РАН, проводились в 2003–2009 гг. [3]. Аналогичная по конструкции камера TORTORA (Telescopio Ottimizzato per la Ricerca dei Transienti Ottici Rapidi) [4] была установлена в 2006 г. на монтировке роботического телескопа REM в обсерватории La-Silla (ESO, Чили). При диаметрах объективов 15 и 12 см (светосиле 1:1,2) и полях зрения 400–600 квадратных градусов пределы обнаружения у этих инструментов близки к 10 звездной величине в V-полосе при экспозиции 0,128 с (частота кадров – 7,5 Гц) при угловом разрешении около 1'. Обработка данных проводилась в реальном времени на основе сопоставления каждого нового кадра с текущим средним, определенным по сотне предыдущих. При таком подходе удалось обеспечить возможность обработки и анализа в реальном времени данных, получаемых с субсекундным времененным разрешением [2].

В 2008 году на телескопе TORTORA была обнаружена яркая оптическая вспышка (5,5 зв. величины), сопровождавшая гамма-всплеск GRB 080319B. Была найдена ее тонкая временная структура на секундной шкале, что позволило изучить связь оптического и гамма-излучения всплеска и показать сходство их кривых блеска при двухсекундном запаздывании первого относительно второго. Таким образом впервые в прямых наблюдениях были получены данные о природе многочастотного поведения гамма-всплесков и об особенностях источника их энергии [5, 6].

С помощью камер FAVOR и TORTORA также в большом количестве регистрировались метеоры и околоземные объекты (искусственные спутники Земли и космический мусор) с предельной яркостью до 9 зв. величины и угловыми скоростями до нескольких десятков градусов в секунду.

Успешная работа инструментов FAVOR и TORTORA позволила продолжить развитие методологии широкогольного поиска быстрых оптических транзиентов. Прежде всего, надо было повысить проницание инструмента как минимум на 1–2 зв. величины при сохранении или даже увеличении размера его поля зрения.

Представляется, что естественным способом развития методов широкогольного мониторинга высокого временного разрешения является переход к многообъективным конфигурациям с уменьшением поля зрения отдельного инструмента (увеличением его углового разрешения) при сохранении или увеличении полного поля зрения [7]. В то же время для выполнения условия доминирования шума неба над шумом приемника нужно увеличивать квантовый выход последнего и/или использовать малошумящие детекторы (ПЗС-матрицы с внутренним усилением, sCMOS-приемники). С другой стороны, принципиально важным моментом в изучении транзиентов является определение их спектральных (цветовых)

характеристик и поляризации непосредственно после обнаружения. Напомним, что на гамма-телескопах измерение поляризации жесткого излучения пока практически не реализовано, а именно ее уровень является критическим для выбора базисной модели генерации излучения гамма-всплесков. В силу этого обстоятельства поляризационные исследования оптических вспышек, сопровождающих гамма-эмиссию, обретают особую важность (см., например, [8]). Многоканальные инструменты позволяют проводить и многоцветную фотометрию, и поляриметрию обнаруженных транзиентов за счет быстрой (за секунды) переориентации каналов на такой объект с введением в различных каналах разных цветовых и поляризационных фильтров, обеспечивающих одновременную регистрацию излучения в BVR-полосах и его компонент с различной ориентацией плоскости поляризации. Подчеркнем, что сочетание (и быстрая смена) двух режимов – широкогольного мониторинга с полем зрения около 900 кв. градусов, когда разные каналы (объективы) направлены на разные области неба, и узкопольного исследовательского при регистрации всеми каналами излучения одной площадки в 100 кв. градусов – требует глубокой автоматизации всего наблюдательного комплекса.

По существу он должен представлять из себя автономную интеллектуальную систему, способную самостоятельно принимать информацию о состоянии локального астроклимата, выбирать и реализовывать режим текущих наблюдений, регистрировать данные, обрабатывать их на разных временных шкалах, в том числе в реальном времени, менять режимы в зависимости от результатов наблюдений, сохранять полученную информацию и обеспечивать функционирование содержащих ее баз данных. Система Mini-MegaTORTORA (MMT-9), созданная совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, НПК «СПП» СОН «Архыз» и ООО «Параллакс», начавшая свою работу летом 2014 г., соответствует всем вышенназванным условиям.

Ниже мы описываем структуру наблюдательного комплекса, его информационное обеспечение, характеристики и особенности функционирования, а также приводим некоторые результаты наблюдений, проведенных с его помощью.

II. ДИЗАЙН, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ММТ-9

A. Общие сведения о системе

Система Mini-MegaTORTORA (MMT-9) состоит из 9 каналов (рис. 1), установленных попарно на 5 экваториальных монтировках (подробнее о системе см. [9]). В каждом канале перед объективом расположено плоское целостатное зеркало, поворачивающееся вокруг двух осей на десять градусов, что позволяет изменять расположение поля зрения каждого канала на небесной сфере в пределах $\pm 20^\circ$.

Кроме того, каждый объектив снабжен набором цветовых и поляризационных фильтров, которые могут вводиться в световой пучок в процессе наблюдений. Это позволяет быстро переходить от широкопольного мони-

торинга без фильтров к наблюдениям в исследовательском режиме, когда все объективы направлены на одну область, содержащую только что обнаруженный транзистент, и регистрируют ее во всех возможных комбинациях цветовых и поляризационных фильтров.



Рис. 1. Система Mini-MegaTORTORA (MMT-9). Верхняя научная площадка САО РАН, Нижний Архыз, Россия

Каждый канал снабжен быстрым детектором Andor Neo sCMOS размером $6,5 \times 6,5$ мкм с разрешением 2560×2160 пикселей. Рабочая экспозиция – 0,1 с при частоте считывания 10 Гц. Эти приемники имеют довольно низкий шум считывания (медианное значение стандартного отклонения – 1,2 электрона на пиксель) и пренебрегают малым темновой ток.

Все пять монтировок установлены в автоматизированном укрытии, в нижней части (техническом отсеке), которого размещен блок электропитания силовых приводов всех механических элементов комплекса ММТ-9, а также устройства жидкостного охлаждения каналов и системы климат-контроля на базе двух осушителей воздуха SOTES CR300. Кроме того, комплекс оснащен метеостанцией, широкоугольной камерой обзора всего неба и датчиком яркости фона ночного неба позволяющей отслеживать погодные условия и принимать решение о начале и окончании наблюдений как в автоматическом режиме так и наблюдателями (при необходимости).

Одиночный канал имеет поле зрения около 100 кв. градусов, а вся система ММТ-9 в режиме широкопольного мониторинга – около 900 кв. градусов. Предел обнаружения составляет около 10–11 зв. величин за 0,1 с в V-фильтре (около 15 зв. величины за 60 с). В исследовательском режиме при наблюдениях отдельных объектов размер поля зрения системы уменьшается до 100 кв. градусов, а предельная звездная величина зависит от используемой комбинации фотометрических и поляризационных фильтров.

Управление системой в целом и анализ получаемых при наблюдениях данных в реальном времени осуществляется программным обеспечением, в целом аналогичным использовавшемуся в камерах FAVOR и TORTORA [3, 4, 10, 11]. В то же время информационная структура системы ММТ-9 существенно сложнее ранее реализованных версий, как по числу аппаратных элементов, так и по объему математического обеспечения. Программно-вычислительный комплекс (информационный кластер)

системы Mini-MegaTORTORA реализован на базе 12 компьютеров, – по одному на каждый канал для сбора, анализа, хранения данных и управления наблюдениями (один в резерве) и два для общего управления сбора и хранения информации, – объединенных в быструю локальную сеть. Комплекс расположен в нескольких десятках метров от системы в отдельном отапливаемом помещении. Наблюдательные данные поступают к нему по каналу оптической связи. В информационный кластер поступают также и данные от метеостанции, allsky-камеры и датчика яркости неба. Комплекс алгоритмов и программ для текущей и апостериорной обработки данных в первую очередь позволяет автоматически обнаруживать как неподвижные, так и движущиеся транзиенты, классифицировать и при возможности идентифицировать их (находить в каталогах известных источников либо относить к вновь обнаруженным), определять их параметры и принимать решение о возможном переходе к исследовательскому режиму. Эти средства основаны на методе дифференциального анализа данных, т. е. количественном сравнении распределения интенсивности излучения в новом зарегистрированном кадре с усредненным по 100 предшествующим [3, 11]. Структура математического обеспечения представлена в [12].

B. Режимы наблюдений

Основным режимом функционирования системы Mini-MegaTORTORA является широкопольный мониторинг небесной сферы с полем зрения около 900 кв. градусов. Он обеспечивается программным блоком автоматического планирования наблюдений, который учитывает погодные условия, положения Солнца и Луны, необходимость избегания горизонта, заданные приоритетные зоны для наблюдений (в частности, поля зрения гамма-телескопов Fermi и Swift).

В процессе обзора проводится быстрая дифференциальная фотометрия и классификация обнаруженных транзиентов путем сравнения с собственными базами данных и информацией из набора каталогов.

При обнаружении объекта с заданными в автоматическом планировщике наблюдений характеристиками (яркость, скорость движения, поведение на 3–4 последовательных кадрах, форма трека) за 2–3 с осуществляется переход к исследовательскому режиму в разных комбинациях размеров полей зрения (от 100 до 300 кв. градусов), а также цветовых и поляризационных фильтров.

Предусмотрена также смена режимов по внешним сигналам – в частности, сообщениям с космических и наземных телескопов разных диапазонов. Все эти функции осуществляются по командам программного блока управления системой в целом, структура которого показана.

Отметим, что в настоящее время оригинальные кадры с временным разрешением 0,1 с сохраняются в течение нескольких суток, при этом объем таких данных, накопленных за среднюю наблюдательную ночь составляет около 30 Тб. Усредненные по 100 кадрам массивы сохраняются.

Информационная система комплекса выполняет также следующие задачи: поддержка баз данных для каждого типа уже известных объектов, текущее сравнение полученных характеристик с информацией из других каталогов и баз данных; поддержка базы данных для вновь обнаруженных объектов, детальное изучение их свойств, сравнение с результатами наблюдений в других диапазонах, выводы об их природе; поддержка специализированных баз данных для транзисторов, отнесенных к космическому мусору и метеорам.

Доступ к программной системе реализован при помощи веб-интерфейса, что позволяет планировать и управлять наблюдениями а также получать наблюдательные данные удаленно и независимо от архитектуры используемого компьютера.

III. НАБЛЮДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ MINI-MEGATORTORA И НЕКОТОРЫЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

C. Наблюдения

Начиная с июня 2014 г., система ММТ-9 ведет регулярный мониторинг небесной сферы с целью поиска и исследования транзиентных событий различных классов. В этом режиме работы площадки размером $30^\circ \times 30^\circ$ наблюдаются серией в течение 1000 с каждая с временным разрешением 0,1 с и проникающей силой около 11 зв. величины; при этом осуществляется равномерное покрытие всей доступной полусфера неба за среднюю наблюдательную ночь. Для поиска долговременной переменности различных объектов (и обнаружения новых) проводится глубокий обзор той же области перед каждой серией мониторинга и после нее (см. следующий раздел).

D. Архив данных MMT-9 Sky Survey и база данных фотометрии

Полученные снимки глубокого обзора хранятся в базе данных (с июня 2014 по настоящее время). Большая часть кадров была получена с экспозициями от 20 до 60 с, в основном без использования фотометрических или поляризационных фильтров. Чтобы соотнести инструментальную фотометрическую систему без фильтров снимков в архиве со стандартной системой BVR, была проведена редукция изображений с учетом блеска миллионов точечных источников по всей области видимости обзора [13]. Для всех снимков были проведены фотометрические измерения, кривые блеска всех объектов в архиве находятся в открытом доступе в базе данных MMT-9 Sky Survey Photometry [14]. По состоянию на 14 сентября 2021 года в архиве находится 1478530 снимков.

E. Искусственные спутники Земли и космический мусор

Подсистема анализа данных в реальном времени выделяет и классифицирует, в числе прочих транзиентных явлений, несколько сотен пролетов ИСЗ и фрагментов космического мусора каждую ночь [15, 16].

Все проводки этих объектов анализируются, их координатная информация и оценки блеска сохраняются в базе данных ИСЗ ММТ-9. В ее открытую часть входят все измеренные ИСЗ, идентифицированные по публичным орбитальным данным и не принадлежащие Российской Федерации.

По состоянию на 11 сентября 2021 года в базе хранятся измерения для 9 289 ИСЗ по 348 479 проводкам [14].

Высокое временное разрешение системы ММТ-9 позволяет детально изучать кривые блеска искусственных объектов, а следовательно, исследовать их форму и внутреннюю динамику. На рис. 2 приведен пример кривой блеска для космического аппарата (КА) 25991, где заметен вклад быстро вращающегося элемента конструкции [16].

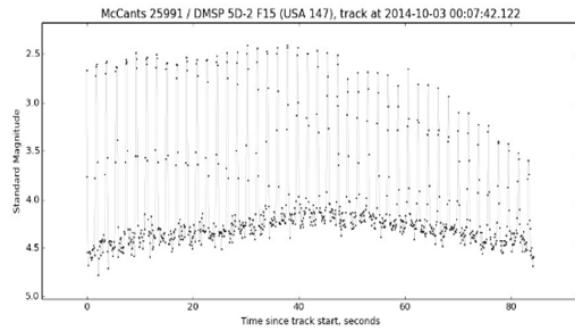


Рис. 2. Осцилляции блеска с амплитудой 1–2 величины и периодом 1,91 с, вызванные вращением антенны радиометра КА 25991

F. Метеоры и метеорные потоки

Каждую наблюдательную ночь в ходе мониторинга небесной сферы на ММТ-9 регистрируется до нескольких сотен метеорных событий. После обнаружения в реальном времени, они автоматически анализируются с целью определения их координат, направления, угловой скорости, профиля яркости и т.д. Полученная информация и кадры для всех метеорных событий сохраняются в базе данных метеоров ММТ-9 [14].

Характеристики системы Mini-MegaTORTORA позволяют массово регистрировать одни из самых слабых метеоров в оптическом диапазоне – вплоть до 9 зв. величины. Большая часть метеоров в базе данных имеют блеск около 5–6 зв. величины, это на несколько звездных величин слабее, чем в базах данных таких сетей как EDMOND, SonotaCo, NFC, GMN (см. рис. 3).

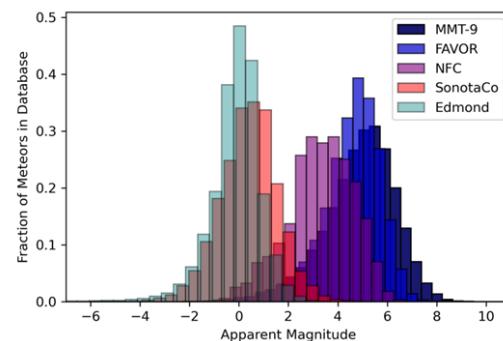


Рис. 3. Распределение видимого блеска метеоров в базах данных MMT-9, FAVOR, NFC, SonotaCo, Edmond

Распределение метеорных треков на небе в течение одной наблюдательной ночи позволяет статистически оценивать активность метеорных потоков: сопоставлять видимые направления метеоров с радиантами активных метеорных потоков при соответствующей солнечной долготе по данным каталога IAU Meteor Data Center [17].

По состоянию на 14 сентября 2021 года в базе данных метеоров ММТ-9 хранится информация о 313519 событиях.

Для получения информации о траекториях и массах метеорных тел были начаты базисные наблюдения (база 3,8 км) с использованием телескопа FAVOR [18, 19].

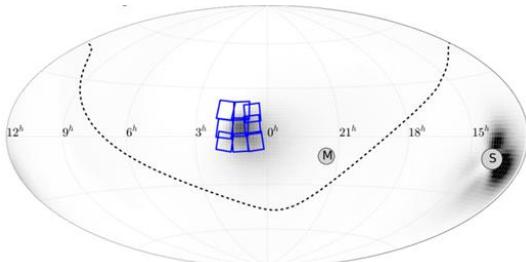


Рис. 4. Область мониторинга в ходе поиска оптического компаньона гравитационно-волнового триггера LVT 151012. Пунктирной линией отмечен горизонт в момент проведения наблюдений. Кружки с буквами S и M отмечают положение Солнца и Луны, соответственно.

G. Вспышки

В процессе мониторинга каждую ночь регистрируется до нескольких десятков коротких вспышек неизвестного происхождения. При длительности этих событий от 0,3 до 1 с и уровне блеска вплоть до 5–6 зв. величины подсистема обработки в реальном времени идентифицирует их за 0,3 с как неподвижные события. В то же время после перехода к исследовательскому (узкопольному) режиму, в котором наблюдения площадки с транзистором продолжаются до 100 с, они, как правило, отождествляются со спутниками, поскольку удается обнаружить их перемещение при повторных возрастаниях яркости.

Тем не менее, и после определения координат транзисторов в исследовательском режиме около 10 % из них не отождествляются со спутниками из базы данных NORAD.

В настоящее время проводится статистический анализ выборки из 1000 вспышек неизвестного (на данный момент) происхождения – проверяется их возможная повторяемость, проводится кросс-отождествление с существующими базами данных и каталогами. Разумеется, с высокой вероятностью большинство этих событий связано с отсутствующими в каталогах спутников искусственными объектами. Тем не менее можно допустить, что эти вспышки являются оптическими компонентами не наблюдавших внеосевых гамма-всплесков, проявлениями гравитационно-волновых событий в оптическом диапазоне, высокочастотными компаньонами быстрых радиоимпульсов, сигналами внеземных цивилизаций.

H. Гравитационные волны

Система Mini-MegaTORTORA включена в международную кооперацию по поиску гравитационных волн – их оптических компаньонов, в частности. Для решения этой задачи в силу своего высокого временного разрешения и большого поля зрения ММТ-9 приспособлена наилучшим образом. Последнее обстоятельство особенно важно из-за больших размеров боксов ошибок детекто-

ров гравитационных волн, составляющих несколько сотен градусов. В то же время заранее не существует представлений о соотношении моментов генерации собственно гравитационного и электромагнитного излучения, возможно с ним связанныго [20–23]. Таким образом, поиск оптических компаньонов гравитационно-волновых импульсов сводится к сканированию бокса ошибок зарегистрированного события с целью обнаружения в нем нового оптического объекта. Интенсивность этих исследований существенно возросла после первого обнаружения гравитационно-волнового импульса GW 150914, обусловленного слиянием двух черных дыр [24]. Второй триггер, LVT 151012 (см. рис. 4), был зарегистрирован 12 октября 2015 г. и, хотя он впоследствии оказался шумовым сигналом, поиски его возможного электромагнитного компаньона проводились в различных диапазонах спектра (см., например, [25]). В частности с помощью системы ММТ-9 мониторинг области локализации триггера был проведен в широкоугольном режиме без фильтров через 9 часов после получения автоматического сообщения.

В плохих погодных условиях (облачность) были накоплены десять 60-секундных экспозиций 900-градусной области в районе антисолнечной точки возможной локализации события. Никаких новых оптических источников обнаружено не было – верхний предел для блеска таких объектов составил 13,5 зв. величину на уровне 5σ .

I. Гамма-всплески

С середины 2015 г. после завершения периода пробной эксплуатации системы Mini-MegaTORTORA инструмент работает как в мониторинговом, так и в исследовательском режимах. За это время было принято 552 сообщения с гамма-телескопа Swift и 1630 сообщений с детектора GBM космической обсерватории Fermi. При этом в первом случае точность координат зарегистрированных гамма-всплесков составляла несколько угловых минут, а во втором – от нескольких до десятков градусов. Эта разница и обусловила различие в выборе режимов наблюдений для поиска и исследования вероятных оптических компаньонов этих гамма-всплесков.

При реакции системы на 25 обнаруженных телескопом Swift событий, чьи координаты были доступны для оперативного перенаведения ММТ-9, вводился режим поляриметрии (в каналах устанавливались поляризационные фильтры с тремя различными ориентациями плоскости поляризации, и все каналы направлялись на область локализации всплеска), и через 30–60 с начиналось накопление данных с временным разрешением 1–5 с (было бы достаточно для определения наличия линейной поляризации в излучении объекта на уровне около 5 %) в зависимости от прозрачности, стабильности изображений, уровня фона неба. Ни в одном случае не были обнаружены оптические транзисторы с блеском, превышавшим 12–13 зв. величин в полосе V.

При реакции системы на 93 сообщений с телескопа Fermi система проводила широкоугольные наблюдения областей их локализации с экспозициями 30 с после перенаведения, длительность которого варьировалась от 20 до 90 с. Проницающая сила системы при этом составляла около 13–14 зв. величины.

Таким образом 4–5% регистрируемых на гамма-телескопах всплесков были доступны для исследований на ММТ-9. Для остальных сообщений либо положения всплесков были под горизонтом, либо слишком близки к Луне, либо наблюдения не могли проводиться из-за плохой погоды.

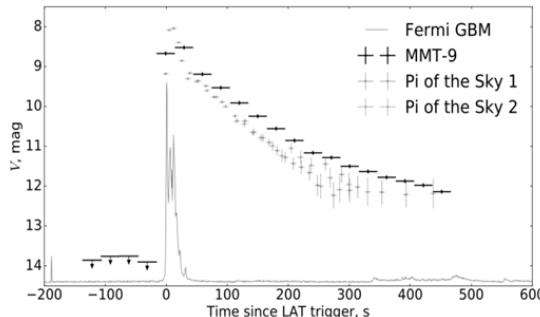


Рис. 5. Кривая блеска оптической вспышки GRB 160625B, сопровождавшей второй эпизод активности (первый – короткий прекурсор, который инициировал триггер детектора GBM – произошёл в момент времени около –180 с). Также приведены данные, полученные широкоугольной системой Pi of the Sky [28].

Область локализации гамма-всплеска GRB 160625B наблюдалась с помощью системы Mini-MegaTORTORA перед, в течение и сразу после момента LAT триггера ($T_0 = 2016-06-25 22:43:24$). ММТ-9 среагировала на триггер Fermi GBM 488587220, сгенерированный в результате регистрации прекурсора, опережающего упомянутый (второй) эпизод активности всплеска на 180 с, и начала наблюдения в момент UT 2016-06-25 22:41:07, через 52 с после GBM триггера и за 136 с до LAT триггера. Из-за большого размера бокса ошибок наблюдения проводились в широкоугольном

режиме с полем зрения $30^\circ \times 30^\circ$ при экспозиции 30 с в белом свете для достижения наилучшей проницающей силы. При этом было накоплено 20 кадров на интервале времени от T_0-136 до T_0+466 с.

Система зарегистрировала [26] яркую оптическую вспышку в кадре, соответствующем моменту LAT триггера ($T_0-15,9 \dots T_0+14,1$ с) по координатам, согласующимся с обнаруженным позднее [27] послесвечением, и звездной величиной около $V = 8,8$. На следующем кадре было зафиксировано некоторое пограничание приблизительно на 0,1 зв. величины, после чего блеск монотонно падал по примерно степенному закону с показателем $-1,6$ вплоть до $V = 12,2$ зв. величины на последнем кадре выборки. Во временном интервале, предшествовавшем LAT триггеру, не были зарегистрированы события с блеском, превышавшим $V = 13,5$ зв. величин.

На оптической кривой блеска (см. рис. 5) выделяется начальный пик, близкий к длительности собственно гамма-всплеска, составляющей около 40 с. По-видимому здесь можно говорить о промпт-фазе излучения, которая плавно переходит в послесечение примерно на 50 с после начала гамма-события.

Подробное описание феномена гамма-всплеска GRB 160625B на основании многочастотных наблюдений, включая результаты, полученные с ММТ-9, можно найти в [29].

Новая оптическая вспышка, сопровождавшая гамма-всплеск, была обнаружена ММТ-9 через 55 секунд после регистрации мощного и далекого события GRB 210619B [30–33]. Система перевелась на область локализации гамма-источника после получения алерта с ее координатами. Наблюдения проводились синхронно в четырех каналах с временным разрешением 1, 5, 10 и 30 секунд с фильтрами B, V и в белом свете. Оптический транзистент достиг в максимуме блеска 10,5 зв. вел, что было установлено двумя 50-ти сантиметровыми телескопами через 30 секунд начала гамма-всплеска (см. рис. 6).

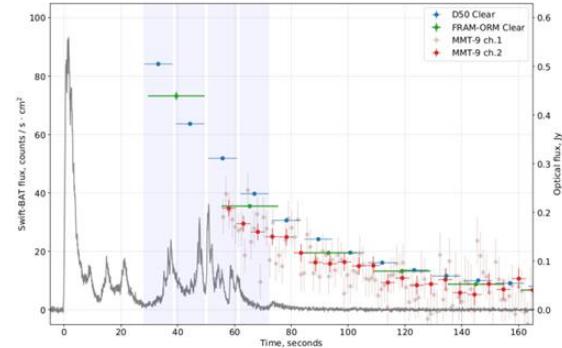


Рис. 6. Ранние оптические кривые блеска, полученные с помощью 50-сантиметровых телескопов D50 и FRAM-ORM и ММТ-9 (каналы с 1 с и 5 с временным разрешением). Чёрная линия описывает зависимость скорости счета детектора BAT телескопа Swift от времени

Совокупный анализ результатов наблюдений в оптическом и гамма-диапазонах (миссии Swift и Fermi) показал, что впервые обнаружены проявления обратной ударной волны при генерации излучения различных энергий. Экстремальный оптический блеск и другие особые свойства гамма-всплеска GRB 210619B оказались обусловлены его связью с узким выбросом замагниченной плазмы, распространяющимся в весьма разреженной межзвездной среде [arXiv:2109.00010].

IV. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ШИРОКОУГОЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП

Естественным развитием концепции многоканальных мониторинговых систем высокого временного разрешения является проект многотелескопного комплекса высокого временного разрешения SAINT (Small Aperture Imaging Network Telescope) [34].

Назначение этого инструмента – обнаружение и исследование быстропеременных явлений и объектов, в том числе, искусственного (внеземного) происхождения. Основным режимом наблюдений является оптический мониторинг небесной сферы с высоким временным разрешением.

SAINT состоит из 100–500 малых телескопов диаметром 40–100 см с полем зрения каждого около 1–2 кв. градуса (его полное поле зрения – 100–500 кв. градусов) и временным разрешением 0.001–0.1 с.

В режиме мониторинга телескоп аккумулирует информацию обо всех стационарных и транзиентных (во времени и пространстве) источниках оптического

излучения, локализованных на 25–100 % площади небесной полусфера (20 000 кв. градусов), вплоть до 22–23 зв. величины за одну ночь наблюдений, каждое поле размером 100–500 кв. град. наблюдается в течение получаса единожды за ночь.

При обнаружении оптического транзисента все телескопы комплекса за доли секунды переориентируются на область его локализации для детального исследования (поляризационного, фотометрического, спектроскопического). В этом (исследовательском) режиме SAINT эквивалентен телескопу 4–10 метрового диаметра и может использоваться для решения всех стандартных астрофизических задач. Накопление, обработка в реальном времени и сохранение данных проводится в автоматическом режиме, как и функционирование всего комплекса. По существу SAINT является интеллектуальной автономной системой, способной выбирать режимы исследований и изменять их стратегию на основе полученной информации.

В процессе мониторинга выполняется основная цель – обнаружение новых и исследование уже известных нестационарных объектов различной природы и локализации. Впервые в мире будет получена непрерывно обновляющаяся динамическая картина как ближнего, так и дальнего космического пространства с субсекундным временным разрешением.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная цель наблюдений с системой Mini-MegaTORTORA – обнаружение новых и исследование уже известных нестационарных объектов различной природы и локализации. Впервые в мире может быть получена непрерывно обновляющаяся динамическая картина как ближнего, так и дальнего космического пространства с субсекундным временным разрешением. В принципе, можно выделить целый набор основных направлений, в рамках которых использование ММТ-9 может привести к новым как качественным, так и количественным результатам в исследованиях различных объектов. Коротко перечислим их.

- Исследования ближнего космического пространства (NEO)
 - объекты искусственного происхождения (ИСЗ и космический мусор);
 - метеоры и болиды.
- Изучение Солнечной Системы
 - астероиды;
 - кометы.
- Исследования Галактики (около 50 миллионов звезд, доступных для наблюдений)
 - вспыхивающие звезды;
 - новые;
 - транзиты экзопланет;
 - переменные звезды;
 - эффекты микролинзирования звезд.

- Изучение Метагалактики
 - ядра активных галактик, квазары, блазары;
 - вспышки сверхновых (около 100 за год);
 - оптические компаньоны быстрых транзиентов разного происхождения – гамма-всплесков, гравитационно-волновых событий, быстрых радиовсплесков.

Основной результат реализации проекта – создание инструмента нового типа для обнаружения и изучения быстропеременных (во времени и пространстве) источников оптического излучения заранее неизвестной локализации. В конечном итоге система Мини-МегаТОРТОРА позволит построить общую выборку объектов, переменных на временах вплоть до долей секунды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Она поддержана Федеральной программой повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) Федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Bondi H. Astronomy of the Future // Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society. – 1970. – Vol. 11. – P. 443.
- 2 Beskin G.M. et al. Discovery of the fast optical variability of GRB 080319B and the prospects for wide-field optical monitoring with high time resolution // Physics-Uspekhi, – 2010. – 53 (4). – P. 406-414.
- 3 Karpov S., Beskin G., Biryukov A. et al. Optical camera with high temporal resolution to search for transients in the wide field // Nuovo Cimento C. – 2005. – Vol. 28, issue 4. – P. 747-750.
- 4 Molinari E., Bondar S., Karpov S., Beskin, G. et al. TORTOREM: two-telescope complex for detection and investigation of optical transients // Nuovo Cimento B. – 2006. – Vol. 121, Issue 12. – P. 1525-1526.
- 5 Racusin J.L., Karpov S.V., Sokolowski M. et al. Broadband observations of the naked-eye γ-ray burst GRB080319B // Nature. – 2008. – Vol. 455, Issue 7210. – P. 183-188.
- 6 Beskin G., Karpov S., Bondar S. et al. Fast Optical Variability of a Naked-eye Burst-Manifestation of the Periodic Activity of an Internal Engine // ApJ. – 2010. – Vol. 719, Issue 1. – P. L10-L14.
- 7 Beskin G., De-Bur V., Karpov S. et al. Search for optical signals from extraterrestrial intelligence at SAO RAS: past, present and future // Bulletin of Special Astrophysical Observatory. – 2007. – 60.61. – P. 217-225.
- 8 Koprač D., Mundell C.G., Japelj J., et al., Limits on Optical Polarization during the Prompt Phase of GRB 140430A // The Astrophysical Journal. – 2015. – Vol. 813, Issue 1, article id. 1. – P. 14.
- 9 Biryukov A., Beskin G., Karpov S. et al. The first light of Mini-MegaTORTORA wide-field monitoring system // Baltic Astronomy. - 2015, Vol. 24,p. 100-108.
- 10 Zolotukhin I., Beskin G., Biryukov A. Et al. Optical Camera with high temporal resolution to search for transients in the wide field // Astronomische Nachrichten. – 2004. – Vol. 325. – P. 675.
- 11 Karpov S., Beskin G., Bondar S. et al. Wide and Fast: Monitoring the Sky in Subsecond Domain with the FAVOR and TORTORA Cameras // Advances in Astronomy. – 2010, article id. 784141.
- 12 Beskin G.M., Karpov S.V., Biryukov A.V. et al. Wide-field monitoring with Mini-MegaTORTORA multi-channel telescope with high temporal resolution // Astrophysical Bulletin. – 2017. – Vol. 72, Issue 1. – P. .81-92.
- 13 Karpov S.V., Beskin G.M., Biryukov A.V. et al. Photometric calibration of a wide-field sky survey data from Mini-MegaTORTORA // Astronomische Nachrichten. – 2018. – Vol. 339, Issue 5. – P. 375-381.
- 14 Официальный сайт ММТ-9. – URL: <https://mmt.sonarh.ru> (дата обращения 15.09.2021).

- 15 *Katkova E.V., Beskin G.M., Bondar S.F. et al.* Photometry of artificial satellites on MMT-9 during last five years // INASAN Science Reports. – 2020. – Vol. 5 (1). – P. 5-8.
- 16 *Каткова Е.В., Бескин Г.М., Бирюков А.В. и др.* Массовая фотометрия низкоорбитальных ИСЗ на ММТ-9 // Сборник трудов конференции "Околоземная Астрономия-2015". – 2016. – С. 261-267.
- 17 *Neslušan L., Poručan V., Svoreň J. et al.* On the new design of the IAU MDC portal, WGN // Journal of the International Meteor Organization. – 2020. – Vol. 48, No. 6. – P. 168-169.
- 18 *Орехова Н.В., Бескин Г.М., Бирюков А.В. и др.* Наблюдения метеоров с системой Mini-MegaTORTORA (MMT-9) // Сборник трудов конференции "Околоземная Астрономия-2015". – 2016. – С. 76-82.
- 19 *Karpov S.V., Orekhova N., Beskin G.M. et al.* Two-station meteor observations with Mini-MegaTORTORA, FAVOR wide-field monitoring systems // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica (Serie de Conferencias). – 2019. – 51. – P. 127-130.
- 20 *Stubbs C.W.* Linking optical and infrared observations with gravitational wave sources through transient variability // Classical and Quantum Gravity. – 2008. – 25.18: 184033.
- 21 *Andersson N., Baker J., Belczynski K. et al.* The transient gravitational-wave sky // Classical and Quantum Gravity. – 2013. – 30.19, 193002.
- 22 *Aasi J., Abadie J., Abbott B.P. et al.* First searches for optical counterparts to gravitational-wave candidate events // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2014. – 211.1. – P. 7.
- 23 *Loeb A.* Electromagnetic counterparts to black hole mergers detected by LIGO // The Astrophysical Journal Letters. – 2016. – 819.2: L21.
- 24 *Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al.* GW151226: observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence // Physical review letters. – 2016. – 116.24, 241103.
- 25 *Evans P.A., Kennea J.A., Palmer D.M. et al.* Swift follow-up of gravitational wave triggers: results from the first aLIGO run and optimization for the future // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2016. – 462.2. – P. 1591-1602.
- 26 *Karpov S., Beskin G., Bondar S., et al.* GRB Coordinates Network 18574. – 2015.
- 27 *Troja E., Butler N., Watson A.M. et al.* GRB Coordinates Network 19588. – 2016.
- 28 *Batsch T., Castro-Tirado A.J., Czerny H., et al.* 2016, GRB Coordinates Network, 19615.
- 29 *Zhang B.-B., Zhang B., Castro-Tirado A.J. et al.* Transition from Fireball to Poynting-flux-dominated Outflow in Three-Episode GRB 160625B // Nature Astronomy. – 2018. – No. 2. – P. 69-75.
- 30 *D'Avanzo P., Bernardini M.G., Lien A.Y., et al.* 2021, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30261, 30261.
- 31 *Zhao Y., Xiong S.L., Huang Y., et al.* 2021, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30264, 30264.
- 32 *Svinkin D., Golenetskii S., Frederiks D., et al.* 2021, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30276, 30276.
- 33 *Poolakkil S. and Meegan C.* 2021, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 30279, 30279.
- 34 *Бескин Г.М., Карпов С.В., Плохотниченко В.Л. и др.* Системы широкугольного оптического мониторинга субсекундного временного разрешения для обнаружения и исследования космических угроз // Успехи физических наук. – 2013. – Vol. 183 (8). – P. 888-894.

Применение мобильно-облачных систем для бесконтактного измерения геометрических параметров промышленной продукции и сырья

Самойлов Алексей Николаевич,
Чумичёв Владимир Сергеевич,
Гайдуков Анатолий Борисович
Южный федеральный университет
Ростов-на-Дону, Россия
asamoylov@sfedu.ru

Аннотация. Бесконтактное измерение геометрических параметров промышленной продукции и сырья связано с ограничениями, препятствующими прямому применению современных технологий и методов. К числу таких ограничений относится мобильность в сочетании с высокими требованиями к качеству результатов, сложность задач в сочетании с отсутствием должной квалификации персонала, выполняющего измерительные задачи. Целью доклада является рассмотрение модели процесса бесконтактного измерения, которая позволяет преодолеть существующие ограничения и использовать возможности современных технологий, методов и средств.

Annotation. Contactless measurement of the geometric parameters of industrial products and raw materials is associated with limitations that impede the direct application of modern technologies and methods. These limitations include mobility in combination with high requirements for the quality of results, the complexity of tasks, combined with the lack of proper qualifications of personnel performing measurement tasks. The purpose of the report is to consider a model of the contactless measurement process, which allows you to overcome existing limitations and use the capabilities of modern technologies, methods and tools.

Ключевые слова: бесконтактное измерение, мобильно-облачные системы, фотограмметрия, автоматизация измерений.

Keywords: *Contactless measurement, mobile cloud systems, photogrammetry, measurement automation.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактное измерение геометрических параметров объектов является одним из актуальных трендов в области реализации прикладных технологий и систем промышленной автоматизации [1]. Исследователи сосредотачиваются на повышении точности измерений, выполняемых с помощью разрабатываемых ими комплексов, а также на снижении доли ошибочных измерений.

Методы, позволяющие получать результаты измерения с достаточным для предприятия уровнем точности и приемлемой частотой ошибок, уже созданы и описаны исследователями в работах [2–5]. Как показывают проведенные исследования [6], реальная проблематика

предметной области лежит в другом поле. Бесконтактное измерение геометрических параметров промышленной продукции и сырья, размещенных на местах складирования и подготовки к отгрузке, выдвигает иные требования к мобильности измерительных комплексов. Оператор, выполняющий измерения, должен иметь возможность перемещать комплекс без посторонней помощи и без дополнительных физических нагрузок, негативно сказывающихся на его трудоспособности. Это напрямую отражается на массогабаритных характеристиках измерительного комплекса, которые, в свою очередь, не позволяют размещать на нём высокопроизводительные вычислительные компоненты и устанавливать оптические системы и матрицы высокого качества [1]. Не менее важной проблемой является обучение и квалификация персонала – операторов, выполняющих измерения. Как правило, на таких должностях сотрудники работают в течение коротких отрезков времени (сезон, год), а уровень их квалификации в области информационных технологий не является решающим фактором в отборе кандидатур. Следовательно, процедура измерения должна быть настолько упрощённой, насколько это возможно без потери качества результатов.

Решить данную проблему можно путём изменения самой модели процесса бесконтактного измерения геометрических параметров промышленной продукции и сырья, размещенных на местах складирования и подготовки к отгрузке. Чтобы устранить проблему сохранения производительности измерительного комплекса, необходимо обеспечить непрерывное взаимодействие регистрирующей и вычисляющей частей, причём во внимание следует принять также ограничения каналов передачи данных между ними. Чтобы игнорировать низкий уровень квалификации операторов в области информационных технологий, следует выстроить процесс таким образом, чтобы система управляла пользователем, а не наоборот.

В данном докладе рассмотрены ключевые результаты, полученные в ходе проводимых исследований в области создания мобильно-облачных измерительных комплексов для решения задач прикладной фотограмметрии и, в частности, автоматизации бесконтактных измерений геометрических параметров продукции трубной и лесной промышленности.

II. АРХИТЕКТУРА МОБИЛЬНО-ОБЛАЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Основными требованиями, предъявляемыми к мобильно-облачному измерительному комплексу, являются:

- мобильность на уровне носимых устройств (смартфон, планшет), в том числе автономность по электропитанию на отрезке времени, необходимом для полноценного завершения измерительной процедуры;
- производительность на уровне персональных компьютеров с отдельным графическим процессором;
- расширяемость в части типов измеряемых объектов и методов, обеспечивающих точность измерений.

Разработанная в рамках исследований мобильно-облачная измерительная система имеет многоуровневую архитектуру (рис. 1), что позволяет обеспечить независимость клиентской части от алгоритмов обработки и сделать ее универсальной. Подобные выгоды от разделения функциональности на клиентской и серверной частях известны давно [7]:

В составе компонентов измерительного комплекса выделяются:

1. Регистрирующая часть в виде планшета или смартфона с установленным приложением, выполняющим функции получения цифровых изображений, обработки изображений и вычисления геометрических параметров в случае отсутствия связи с облачным сервисом.
2. Вычисляющая часть в виде облачного сервиса, выполняющего функции обработки изображений и вычисления геометрических параметров измеряемых объектов.

Вычисляющая часть (облачный сервис), в свою очередь, включает в себя:

1. Интеллектуальные компоненты (анализатор изображений, онтологию методов и их комбинаций), выполняющие автоматизацию процесса измерения, а также автоматической предварительной настройки измерительного комплекса на выбранный тип задач.

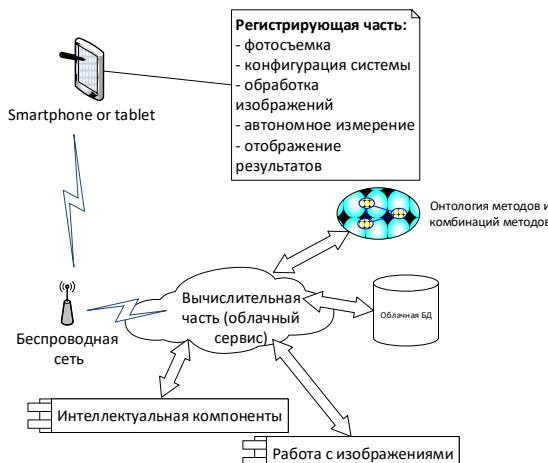


Рис. 1. Архитектура мобильно-облачной системы

2. Компоненты работы с изображениями, выполняющие различные функции предварительной обработки с целью обеспечения требуемого уровня качества измерений;

3. Облачную базу данных, которая содержит результаты выполненных измерений и исходные изображения, полученные от клиентов.

Главным отличием разработанной архитектуры от классических клиент-серверных и многоуровневых является дублирование функций на компонентах системы. В данном случае во главу угла ставится робастность системы, её способность полноценно функционировать даже в случае отсутствия сетевого соединения с облачным сервисом. Принципы балансировки и распределения нагрузки между регистрирующей и вычислительной частями базируются на пропускной способности канала связи. При выборе компонента, на котором будет выполняться операция обработки, анализа или измерения, приоритет отдается исходя из прогнозируемого времени отклика системы. Так, при устойчивом 3G/4G соединении регистрирующая часть будет выполнять функции только фотоаппарата. С понижением пропускной способности канала передачи данных функции переносятся на мобильное устройство в порядке их выполнения: от предварительной обработки изображений до окончательной выдачи результатов.

Облачный сервис, рассматриваемый в данной работе, предназначен для онлайн-обработки изображений, получаемых от мобильных клиентов сервиса по выполнению фотограмметрических измерений. В его основе лежит платформа OpenStack как один из наиболее актуальных на сегодня инструментов разработки.

Данный сервис построен на основе четырех принципов: объединить пространство хранения, оптимизировать доступ к вычислительным ресурсам, уменьшить конкуренцию и оптимизировать многопоточную обработку данных.

Упрощенная архитектура облачного сервиса, соответствующая данным принципам, показана на рис. 2



Рис. 2. Архитектура облачного сервиса

Типовые элементы облачных сервисов, используемые из OpenStack и сопутствующих фреймворков [8-10] показаны на светлом фоне, а элементы, которые являются частью нашей разработки – выделены темным. Распределенная служба хранения версий, которая поддерживает клонирование и теневое копирование развертывается на вычислительных узлах и объединяет части их локальных дисков в общий пул хранения. Клиент облачного сервиса (мобильное приложение для решения задач фотограмметрии) имеет прямой доступ к сервису хранения

и может загружать и скачивать с него изображения. Каждое загруженное изображение автоматически распределяется по сетевому облачному хранилищу. Кроме того, мобильный клиент взаимодействует с облачным промежуточным ПО через API, которое позволяет выполнять различные задачи обработки изображения, включая распознавание образов, предварительную обработку изображений, вычислительные задачи, что рассматривалось в опубликованных ранее работах [1].

Облачное промежуточное ПО кроме прочего координирует вычислительные узлы для выполнения вышеупомянутых задач. В каждом вычислительном узле работает гипервизор, который отвечает за работу виртуальных машин. Операции чтения и записи, осуществляемые через гипервизор, отслеживаются модулем зеркалирования, который отвечает за зеркалирование данных и снимки on-demand, для чего опирается как на локальный диск, так и на распределенную службу хранения версий.

Облачное промежуточное ПО напрямую взаимодействует как с гипервизором, сообщая ему, когда запускать и останавливать виртуальные машины. Например, при росте вычислительной нагрузки на алгоритмы обработки и анализа изображений (случай, когда мобильный клиент подключен по широкополосному каналу передачи данных [11]), облачное промежуточное ПО будет запускать новые экземпляры виртуальных машин для обработки данных. При росте нагрузки на хранилища, соответственно, будут выделяться дополнительные ресурсы для модуля зеркалирования.

III. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ КАЧЕСТВА

Для измерительной системы качество изображения определяется в первую очередь разрешением фотографии. Чем больше пикселей цифрового фото приходится на физическую часть измеряемого объекта, тем более различимым для системы он является.

Повышение разрешения фотографий сегодня выполняется с помощью преимущественно программных методов [12-16], наиболее значимые из которых на сегодняшний день базируются на нейронных сетях. В случае переноса полного функционала на мобильное устройство ввиду нестабильного или отсутствующего соединения с облачным сервисом такой способ существенно снижал бы автономность и мобильность измерительного комплекса. По этой причине был разработан альтернативный подход, позволяющий на принципах склейки одной большой фотографии объекта из множества маленьких фотографий его частей получать снимки с изначально высоким разрешением. Причем разработанный подход позволяет делать изображения практически любых размеров.

Цифровое изображение I в каноническом виде можно представить как двумерную матрицу размерности $m \times n$, где m и n количество пикселей по горизонтали и вертикали. В ячейках такой матрицы записаны значения, характеризующие пиксель, например интенсивность цвета в модели RGB:

$$I = \begin{matrix} 255,255,255 & \dots & 222,122,0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0,0255 & \dots & 0,024 \end{matrix}$$

Представим теперь, что в ячейках матрицы W , описывающей цифровое изображение, содержатся не параметры отображения пикселя, а матрицы, описывающие отдельные упорядоченные фрагменты изображения одинакового размера, то есть сформируем матрицу матриц размерности $p \times q$:

$$W = \begin{matrix} 0,0255 & \dots & 100,100,100 & \dots & \dots & 222,122,0 & \dots & 222,122,0 \\ \dots & \dots \\ 0,0255 & \dots & 123,123,123 & \dots & \dots & 222,122,0 & \dots & 222,122,0 \\ \dots & \dots \\ 0,0255 & \dots & 123,123,12 & \dots & \dots & 0,024 & \dots & 123,123,12 \\ \dots & \dots \\ 0,0255 & \dots & 123,123,12 & \dots & \dots & 123,123,12 & \dots & 222,122,0 \end{matrix}$$

Полученная таким образом матрица будет существенно меньшего размера, поскольку каждая содержащаяся в её ячейках матрица представляет собой полноценное изображение. Так, матрица W размерности 3×3 , состоящая из матриц I размерности 1000×1000 представляет собой изображение размером 3000 на 3000 пикселей.

В практическом ключе приведенные выше гипотезы вытекают в то, что за один фотоснимок формируется лишь часть изображения, а полную картину можно получить, сняв $p \times q$ фотографий объекта. А именно частей объекта, идущих в таком же порядке, как и значения в ячейках матрицы W . Это можно проиллюстрировать следующей блок-схемой (рис. 3).

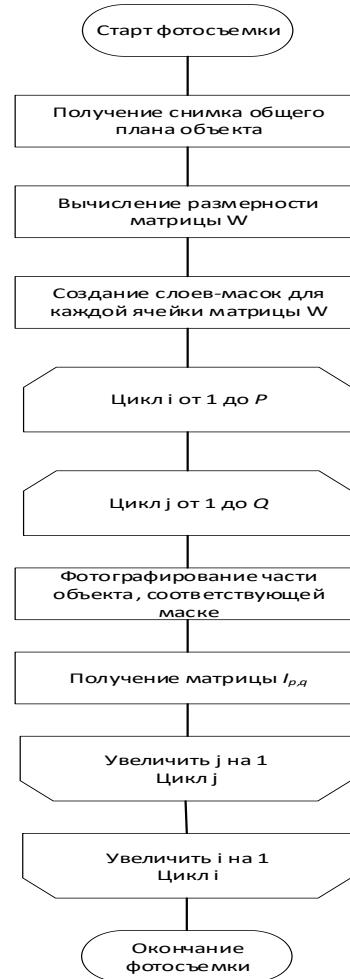


Рис. 3. Блок-схема алгоритма получения снимков высокого разрешения с помощью камеры мобильного телефона

Представленная на рисунке 3 блок-схема соответствует в общих чертах имеющимся алгоритмам получения панорамных и объемных снимков, однако её ключевым отличием является использование в качестве отправной точки – снимка общего плана измеряемого объекта.

IV. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ МОБИЛЬНО-ОБЛАЧНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Суть использования методов машинного обучения в задачах, решаемых с помощью прикладных алгоритмов фотограмметрии сводится к постепенному накоплению знаний относительно успешных вариантов конфигурации методов, используемых на каждом шаге алгоритма и постепенном наращивании влияния процедуры обучения на процесс принятия решения пользователем [17]. Для этого предлагается с использованием производственной модели представления знаний фиксировать сведения о том, как себя вел пользователь (какие он вводил параметры) и соотносить это с успешностью результатов измерительной процедуры. Для оценки «успешности» процедуры на первом этапе предполагается ручной контроль и трекинг результатов измерения в сопряженных системах учета и продажи и, в случае наличия отклонений, выработка инструментов корректировки показателей.

В данном случае предполагается, что по мере накопления базы знаний будут дополнительно разработаны инструменты оценки релевантности ситуаций и система в итоге сможет предлагать пользователю конкретную настройку для выбранных условий съемки и типа измеряемых объектов.

Для окончательной формулировки метода необходимо далее определить условия и решения, которые должны быть зафиксированы в результате процедуры обучения. Так, первым условием, которое должно быть учтено, является тип объекта, который будет обрабатываться с помощью алгоритма. Таким объектом может являться лес, который бывает окореный и не окореный, металлопрокат, который имеет разную форму, может быть полым или цельным. Каждый из объектов может храниться с пересортицей и т.д.

Далее следует принять во внимание геометрические параметры, которые планируется измерить. В различных задачах возможны вариации от элементарного подсчета количества однотипных объектов до сложного измерения объема объектов, хранящихся с пересортицей. Эти условия накладывают ограничения на детализацию объектов на снимках.

Следующее, подлежащее учету, это условия съемки. В зависимости от времени суток, освещения и параметров камеры устройства могут варьироваться настройки фильтров предварительной обработки изображений, которые в случае дальнейшей их бинаризации могут приводить к значительным искажениям. Этот шаг является наиболее ёмким с точки зрения влияния процедуры обучения на конечный результат в виде знаний в базе системы и требует максимально детальной проработки.

Последними условиями является алгоритмы распознавания и идентификации объектов, задача выбора которых сводится к определению такого, который в итоге привел к получению результата с наименьшей погрешностью. Предполагается, что выбор алгоритмов полно-

стью зависит от настройки системы на предыдущих шагах метода и в первую очередь определяется типом измерительной задачи и объектами, геометрические параметры которых требуется измерить.

Таким образом, метод индуктивного обучения окончательно может быть сформулирован следующим образом:

Шаг 1: Определение типа объекта из числа известных системе или наиболее близко подходящего по внешнему виду и форме к одному из известных системе, если такие отсутствуют;

Шаг 2: Определение состава геометрических параметров, подлежащих измерению. При этом следует учесть ограничения на применение расчетных моделей к типам объектов. Например, невозможность расчета объема металлоконструкций сложной формы и/или отсутствие как таковой задачи на практике.

Шаг 3: Определение параметров изображения, которое получается с помощью камеры мобильного устройства. Для этого может быть сделан пробный снимок объекта.

Шаг 4: Определение параметров обработки изображений, которые применил оператор и фиксация их в формате производственных правил «если-то» в базе знаний системы.

Шаг 5: Определение алгоритма распознавания и идентификации объектов. Для этого на начальных этапах оператор осуществляет полный перебор методов, пока не получит достоверный результат. Далее в процедуру подбора по мере накопления базы знаний вмешивается сама система. Для этого в базе знаний также фиксируются производственные правила, описывающие выбор оператора в зависимости от предыдущих условий.

Основываясь на предложенном методе, сформулируем процедуру индуктивного обучения фотограмметрического алгоритма. Для наглядности представим её в виде блок-схемы (рис. 4).

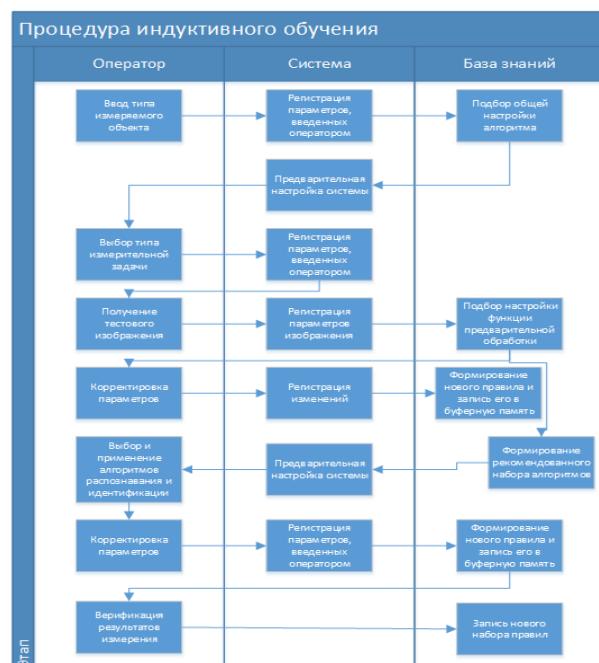


Рис. 4. Процедура индуктивного машинного обучения для фотограмметрического алгоритма

Как видно из рисунка, основу процедуры обучения составляет фиксация антецедентов – условий, при которых оператор начинает выполнять действия. И консеквентов – результатов действий оператора. При этом каждая такая система правил «если-то» фиксируется в буферной памяти системы до верификации результатов. Как только результаты верификации будут подтверждены, правила записываются в основную базу знаний системы и могут быть применены на практике

V. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ И СЫРЬЯ, РАЗМЕЩЕННЫХ НА МЕСТАХ СКЛАДИРОВАНИЯ И ПОДГОТОВКИ К ОТГРУЗКЕ, С ПРИМЕНЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Модель процесса бесконтактного измерения геометрических параметров промышленной продукции и сырья, размещенных на местах складирования и подготовки к отгрузке показана на рисунке 5 и представляет собой спецификацию действий оператора, которые он выполняет при работе с автоматизированной системой фотограмметрических измерений. Данная система представляет собой мобильный клиент к облачному сервису с возможностью локального выполнения функций [1] в случае отсутствия стабильного доступа к сети.

Основу разработанных решений составляет онтология методов и комбинаций методов, позволяющая для заранее известных типовых комбинаций подбирать конфигурацию измерительной процедуры. Для этого оператор при первом запуске должен выбрать подходящий вариант из списка. Варианты включают в себя:

- тип объекта: труба, арматура, лес и пр.;
- измерительная задача: подсчет, площадь, объем;
- условия съемки: погода (ясно, пасмурно), место съемки (открытая площадка, ангар).

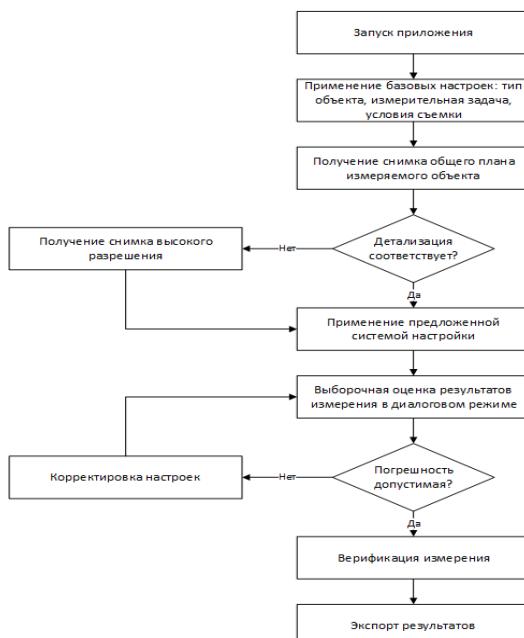


Рис. 5. Модель процесса бесконтактного измерения геометрических параметров промышленной продукции и сырья

По результатам базовой настройки система переходит в режим готовности, после чего оператор приступает к получению фотоснимка объекта. На данном этапе система автоматически определяет минимальный объект на изображении и предлагает оператору оценить достаточность детализации. Если по каким-либо причинам минимальный автоматически определенный объект не соответствует минимальному реально измеряемому объекту, данный снимок используется как маска и система переходит в режим получения снимка высокого разрешения, алгоритм которого изложен в разделе 3 данной работы.

После обработки полученного снимка система предлагает пользователю применить настройки предварительной обработки изображения, либо внести корректиды, если требуется. Далее осуществляется один из важных этапов измерения, который является элементом новизны предлагаемых решений – ручная верификация измерения. Процесс верификации – это последовательность шагов, при которой оператор по подсказкам системы сверяет вычисленные размеры объекта с реальными. При этом система выбирает те объекты, для которых в процессе анализа изображения был скорректирован допуск (невозможно четко определить границы, несоответствие типовой формы и пр.). В случае, если измерения корректны, результат экспортируется, а в базу знаний заносится еще один случай использования системы в соответствии с моделью CBR [18]. В противном случае оператор корректирует настройки вручную так, чтобы результат измерения незначительно отличался от реальных значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные в статье результаты имеют высокую значимость представителей промышленной отрасли: производственных, торговых и использующих по назначению сырье и продукцию трубной и лесной промышленности предприятий.

Мобильно-облачные измерительные системы обладают следующими конкурентными преимуществами:

- минимальная стоимость владения, складываемая из: стоимости приобретения мобильного устройства, оснащенного подходящей по пороговым параметрам цифровой фотокамерой; мобильного приложения в официальном магазине разработчика ОС; абонентской платы за пользование измерительным облачным сервисом;
- автономная работа без подключения к электросети;
- использование малобюджетных фоторегистрирующих устройств (планшетов, смартфонов) без потери качества измерения;
- независимость технологии и результатов ее работы от конкретных производителей и марок оборудования и средств вычислительной техники;
- мобильность, характеризующаяся низким весом комплекса (в пределах 1 кг), малыми габаритами (в пределах 20x20x2 см.), отсутствием проводных соединений;

- высокая скорость обработки и проведения измерения за счет использования облачных сервисов;
- полностью автоматизированный интеллектуально-настраиваемый комплекс методов обработки и выполнения расчета, не требующий от оператора вмешательства при соблюдении допустимых пороговых значений освещенности;
- отсутствие финансовых затрат на монтажные и пуско-наладочные работы;
- отсутствие необходимости физического контакта оператора или комплекса с измеряемыми промышленными изделиями, а также необходимости их перемещения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00577.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Samoylov A., Borodyansky Y., Kostyuk A., Polovko I. Mobile-cloud data processing system on digital images // IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN): Proceedings - 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2019, Helsinki-Espoo, 22–25 июля 2019 года. – Helsinki-Espoo: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 1674-1678. – DOI 10.1109/INDIN41052.2019.8972161.
2. Shvarts D., Tamre M. Bulk material volume estimation method and system for logistic applications // 9th International Conference of DAAAM Baltic: Industrial Engineering; Tallinn; Estonia, 2014. – P. 289-294.
3. Knyaz V.A., Maksimov A.A. Photogrammetric technique for timber stack volume control. International Archives of the Photogrammetry // Remote Sensing and Spatial Information Sciences; Zurich; Switzerland. – 2014. – Vol. 40. – P. 157-162.
4. Чирышев Ю.В., Круглов А.В., Круглов В.Н. Способ измерения кубатуры круглого леса // Патент РФ № 2553714.
5. Madeira S., Gonçalves J., Bastos L. Photogrammetric mapping and measuring application using MATLAB // Comput. Geosci. – 2010. – Vol. 36, No. 6. – P. 699-706.
6. Samoylov A. The method of constructing the structures of configurable automated system for measuring volume of roundwood // WIT Transactions on Information and Communication Technologies, 01–02 декабря 2013 года, 2014. – P. 277-284. – DOI 10.2495/ICTE130341.
7. Buschmann, Frank; Meunier, Regine; Rohnert, Hans; Sommerlad, Peter; Stal, Michael (1996-08). Pattern-Oriented Software Architecture, Vol. 1, A System of Patterns. Wiley, August 1996. ISBN 978-0-471-95869-7. Retrieved from <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471958697.html>.
8. Колосков М.А. Методы обмена данными между клиентом и сервером в веб-приложениях с применением коммуникаций реального времени // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Сб. ст. по мат. XLIII междунар. студ. науч.-практ. конф. – № 6 (42). – URL: [https://sibac.info/archive/technic/6\(42\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/6(42).pdf) (дата обращения: 21.04.2020).
9. Тимченко В.А., Грибова В.В., Федорищев Л.А., Москаленко Ф.М. Технология взаимодействия сервисов облачной платформы iaasras с внешним программным обеспечением // Программные продукты и системы. – 2018. – № 2. – С. 233-238.
10. Васильков А.С., Фомин С.С. Создание прототипа частного облака на базе openstack с помощью установщика devstack // Студенческий вестник. – 2017. – № 9 (9). – С. 51-54.
11. 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). – С. 96-102.
12. K. Ratna Babu and Dr.K.V.N. Sunitha. A New Approach To Enhance Images Of Mobile Phones With In-Built Digital Cameras Using Mean And Variance // International Conference On Advances In Computer Engineering. – 2013.
13. Ignatov A., Kobyshev N., Timofte R., Vanhoey K., & Van Gool L. WESPE: Weakly supervised photo enhancer for digital cameras. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2018. – <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2018.00112>.
14. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Ide, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima and Takashi Naito. Road Image Update using InVehicle Camera Images And Aerial Image // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011.
15. Mohamed Amine Bendoumi, Mingyi He, Shaohui Mei. Hyper Spectral Image Resolution Enhancement Using High-Resolution Multispectral ImageBased On Spectral Unmixing // IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, 2011.
16. Zhang C., Gao J., Wang O., Georgel P., Yang R., Davis J., ... Pollefeys M. Personal photograph enhancement using internet photo collections // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2014. – Vol. 20 (2). – P. 262-275.
17. Druzhkov Paul & Kustikova Valentina. A survey of deep learning methods and software tools for image classification and object detection. Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – 26. 9-15. 10.1134/S1054661816010065.
18. Agnar Aamodt and Enric Plaza. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches // Artificial Intelligence Communications. 7 (1994): 1. – P. 39-52.

A method for determining the frequency of a helicopter main rotor

Roman V. Ermakov

Institute of Applied Information Technologies and Communication
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.
Saratov, Russia
roma_ermakov@yandex.ru

Alexey A. L'vov

Institute of Applied Information Technologies and Communication
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.
Saratov, Russia
alvova@mail.ru

Alexander A. Nikiforov

Institute of Electronic Engineering and Instrumentation
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.
Saratov, Russia
ieei_director@mail.ru

Oleg M. Balaban

Institute of Physics and Technology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.
Saratov, Russia
ombal@mail.ru

Anna A. Seranova

Institute of Applied Information Technologies and Communication
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.
Saratov, Russia
seranova_anna@gmail.com

Mikhail S. Svetlov

Laboratory of System Problems of Control and Automation in Mechanical Engineering
Institute of Precision Mechanics and Control of RAS
Saratov, Russia
svetlovms@yandex.ru

Abstract. The paper proposes a method for extracting signals corresponding to oscillations of a helicopter main rotor from the output signals of accelerometer sensors installed on this helicopter. The method is based on the factorization of the signal matrix and the use of maximum likelihood estimation.

Rotor vibrations are the main source of interference in helicopter inertial control systems. An important feature of this interference is the invariability of its frequency and phase. Therefore, after estimating these two parameters, it is possible to suppress the interfering signal from the helicopter rotor and thereby increase the accuracy of the inertial system installed on the helicopter.

The paper presents the results of numerical modeling and processing of experimental data by the proposed method.

Аннотация. В работе предложен метод выделения сигналов, соответствующих колебаниям несущего винта вертолета, из выходных сигналов датчиков-акселерометров, установленных на этом вертолете. Метод основан на факторизации сигнальной матрицы и использовании оценивания по методу максимального правдоподобия.

Колебания ротора являются основным источником помех в управляющих инерциальных системах вертолета. Важной особенностью этой помехи является неизменность ее частоты и фазы. Поэтому после оценки этих двух параметров можно подавить мешающий сигнал от винта вертолета и тем самым повысить точность работы установленной на вертолете инерциальной системы.

В работе представлены результаты численного моделирования и обработки экспериментальных данных предлагаемым методом.

Keywords: estimation, maximum likelihood method, measurement, inertial navigation, identification, vibration, helicopter.

Ключевые слова: оценка, метод максимального правдоподобия, измерение, инерциальная навигация, идентификация, вибрация, вертолет.

I. INTRODUCTION

When inertial sensors are used on board a helicopter-type aircraft, a problem arises in full growth, associated with a high level of spurious vibrations caused by the rotation of the main rotor [1, 2]. In the accelerometer channel, the amplitude of these vibrations can vary from tenths to units of g. Since many types of angular velocity sensors used in aviation are subjected to vibration, this problem is inherent in the channel of angular velocity [3]. The named aspects complicate the use of inertial sensors on board a helicopter and require the implementation of separate inertial systems for navigation and control channels, which have significantly different frequency bands. In turn, this practice negatively affects the weight and size of the control system, as well as its cost. The described problem is especially relevant for small and ultra-small unmanned aerial vehicles of the helicopter type [1].

One of the characteristic features of a helicopter flying in the air is the high stability of its main rotor angular velocity [1]. Therefore, the knowledge of the frequency and phase of parasitic oscillations arising from the rotational motion of the helicopter rotor makes it possible to suppress these oscillations, increasing drastically the accuracy of the inertial system used. This paper proposes a method for estimating the main rotor frequency from the signals taken by linear acceleration sensors. The method for estimating the phase of a harmonic signal at a known frequency has been well studied [4, 5]. Compensation procedure of the spurious signal caused by the angular rotation of the main rotor is beyond the scope of this work.

II. FREQUENCY ESTIMATION METHODS

It is well-known that methods for determining the parameters of signals having different frequency components are subdivided into parametric and non-parametric. The complexity and laboriousness of the parameter estimation prob-

lem is due to the fact that it belongs to the class of nonlinear estimation problems. Digital non-parametric methods include discrete Fourier transform (DFT) and periodogram analysis [6]. They use only the information contained in the samples of the analyzed signal without any additional assumptions about its characteristics and features. Unfortunately, these methods have a significant disadvantage consisting in the impossibility of simultaneously achieving high resolution in time and frequency. Moreover, these techniques are known to give satisfactory solution of the above-mentioned estimation problem only for well-separated in frequency signal components [7]. This creates certain problems in the analysis of transmitted signals, as well as complex oscillations with a wide spectrum and low signal-to-noise ratio (SNR).

An alternative are parametric methods, which implementation implies the presence of some mathematical model of the analyzed signal. Sometimes the structure of the signals whose parameters are to be estimated allows the factorization of the existing signal matrix to be used. Such factorization can often be performed based on the physical properties of the signals in a particular application, which helps to reveal its inherent structure. In turn, proper use of the signal matrix structure makes it possible to obtain reliable estimates through careful analysis of the signal subspace algebraic structure. The concept of singular value decomposition for frequency estimation was put forward in the Tufts-Coumaresan (TK) method [8]. Linear predictive TK signal estimates can approach the Cramer-Rao boundary (CRB) when the SNR is high. However, in the case of low SNR, this algorithm cannot efficiently estimate the signal frequency. A frequency estimation method based on joint diagonalization of signal matrices was proposed in [9]. It allows one to find independent vectors that have a specific structure and span the null space of a data matrix. These vectors form matrices, which are then jointly diagonalized to obtain frequency estimates. Also, several methods for solving the problem of high noise threshold were proposed in [10]. However, the performance of these methods, as well as the joint diagonalization method, is better only with respect to the SNR of the threshold effect of the TK algorithm.

The other two methods, called estimation of signal parameters via rotational invariance technique (ESPRIT) [11] and constructing the canonical forms of matrices (Matrix Pencil, MP) [12], are high-resolution signal parameter estimation tools. The MP is similar to the ESPRIT with its technique for solving the generalized eigenvalue problem, but the MP algorithm uses the direct data method. The main difference is that ESPRIT works with the signal subspace determined from the correlation matrix, while the MP processes the data directly, which provides significant savings in the number of operations [13]. In [14], it was shown that the MP method and the TK polynomial method are special cases of the matrix prediction approach, but the former is more efficient in computations and less sensitive to noise than the TK algorithm. In cases where it is assumed that the model is a close approximation to a real object, parametric methods provide more accurate estimates and high resolution than nonparametric [6, 15]. However, all of the listed parametric methods are suboptimal.

In cases where the assumed model is close to reality, parametric methods provide more accurate estimates and resolution than nonparametric methods [6], [15]. In [16], a comparison of the MP and the DFT methods performance for

high-resolution spectral estimation was considered. The performance of both methods was examined in the presence of noise and the results were compared with the effective scores corresponding to the CRB. It has been shown that the MP method provides better estimates than the DFT method for some specific threshold of the SNR [16]. Therefore, in this study, we used the MP method as a reference for comparing performance in the threshold region.

The best estimate among other parametric methods for a fixed dataset and a basic probabilistic model is given by the maximum likelihood method (MLM), since the estimates obtained with its help are consistent, asymptotically efficient and asymptotically unbiased [6], [17]. But the main disadvantage of this method is associated with the difficulties in calculating estimates. To solve this problem, the authors propose the following approach.

III. FREQUENCY ESTIMATION BY THE MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD USING DATA MATRIX FACTORIZATON

Let us represent the signal, $\mathbf{u} = [a_x, a_y, a_z]^T$, mathematical model, where a_x, a_y, a_z are the measured values of the acceleration vector projections on the x, y, z axes in the helicopter-related coordinate frame respectively, in the following form:

$$\mathbf{u}_n = \sum_{m=1}^M A_m e^{s_m n} + \xi_m, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

In equation (1), N is the sample size, and the measurement vector \mathbf{u} is the sum of M exponentially decaying sinusoids with unknown complex amplitudes A_m and unknown parameters $s_m = -\alpha_m + j\omega_m$, where α_m are damping coefficients; ω_m are angular or circular frequencies; ξ_m are independent identically distributed samples of the zero mean white Gaussian noise with unknown variance δ^2 .

Additionally let us suppose that the number of samples, N , is rather large, i.e. $N > M^2$. Then one can substitute the relationship (1) by the following matrix representation. The data, \mathbf{u}_n , corrupted by noise can be represented in the following form, which is called a data matrix, \mathbf{U} :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_L & u_{L-1} & \cdots & u_1 \\ u_{L+1} & u_L & & u_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{K-1} & u_{K-2} & \cdots & u_{K-L} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

where $L > M$, $K > M$.

In the previous works [18–21], the authors has shown that in accordance with the proposed method, data matrix, \mathbf{U} , can be defined by the next separable model:

$$\mathbf{U} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{Q} + \Xi, \quad (3)$$

where $\mathbf{U}: m \times n$ is a data matrix; $\mathbf{X}: m \times k$ and $\mathbf{Q}: k \times n$ are unknown matrices having the next structures:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{s_1} & e^{s_2} & \cdots & e^{s_M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e^{s_1 L} & e^{s_2 L} & \cdots & e^{s_M L} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} a_1 e^{s_1 L} & a_1 e^{s_1(L-1)} & \dots & a_1 e^{s_1} \\ a_2 e^{s_2 L} & a_2 e^{s_2(L-1)} & \dots & a_2 e^{s_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_M e^{s_M L} & a_M e^{s_M(L-1)} & \dots & a_M e^{s_M L} \end{bmatrix},$$

and $\Xi : m \times n$ is an additive white Gaussian noise (AWGN) matrix. The generalized model (3) represents estimation procedure as a structured matrix factorization problem. Namely, given the data distorted by noise, it is necessary to find the factors containing information about unknown parameters [18, 20, 21].

The essence of the proposed method for solution of model (3) by the MLM consists in representation of the redundant data matrix (2) in the class of separable models depending on the introduced expansion coefficients and eigenvectors of the Gram matrices $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$ and $\mathbf{U}^T\mathbf{U}$. As a result, the search for the unknown components of the matrices \mathbf{X} and \mathbf{Q} is reduced to minimizing the following quadratic residual form, which is shown in [20, 21, 23]

$$\varepsilon_0(\mathbf{X}, \mathbf{Q}) = \text{Tr}[(\mathbf{U} - \mathbf{X}\mathbf{Q})^T \mathbf{P}(\mathbf{U} - \mathbf{X}\mathbf{Q})], \quad (4)$$

where \mathbf{P} is the covariance matrix, $\text{Tr}[\cdot]$ is the trace of the matrix operator.

If the assumptions concerning the normality of the errors ξ_{iv} are valid, the resulting estimates of the unknown parameters are maximum likelihood estimates, that is, consistent asymptotically unbiased, and asymptotically efficient.

It was shown in [20–23] that the solution, \mathbf{X} and \mathbf{Q} , of the nonlinear set of equations (3) satisfying (4) can be obtained from the following expressions:

$$\mathbf{X} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{S}^{-1}, \quad \mathbf{Q} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{V}^T, \quad (5)$$

where $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_m]$ is a matrix of dimension $N \times m$, composed of m eigenvectors of the Gram matrix $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$; $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_m]$ is a matrix of dimension $M \times m$, composed of m eigenvectors of the Gram matrix $\mathbf{U}^T\mathbf{U}$; \mathbf{S} is a non-degenerate matrix of unknown expansion coefficients of size $m \times m$; $\mathbf{M} = \text{diag}\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}$ is the diagonal matrix of singular values of the matrix \mathbf{U} satisfying the equation:

$$\mathbf{M} = \arg \inf_{\boldsymbol{\mu}_j \in \Sigma_\mu} \left\{ \text{Tr} \left[\left(\mathbf{U} - \sum_{k=1}^m \boldsymbol{\mu}_k^j \mathbf{w}_k \mathbf{v}_k^T \right)^T \mathbf{P} \left(\mathbf{U} - \sum_{k=1}^m \boldsymbol{\mu}_k^j \mathbf{w}_k \mathbf{v}_k^T \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

where the exact lower bound is sought for all possible vectors $\boldsymbol{\mu}_j = (\mu_1^j, \dots, \mu_m^j)^T$ of length m consisting of singular values of the matrix \mathbf{U} obtained by selection of m values from the total set Σ_μ of all singular values for given matrix, \mathbf{U} . Moreover, the eigenvectors that make up the matrices \mathbf{W} and \mathbf{V} correspond to m singular values of the matrix \mathbf{U} , and the matrix \mathbf{S} of the expansion coefficients satisfying (4) is unique.

Substitution of the found eigenvectors into (5) gives the desired maximum likelihood estimates for the parameters \mathbf{x}_i and state vectors \mathbf{q}_i , provided that it is possible to find the matrix of expansion coefficients \mathbf{S} .

Optimization of the model by expansion in terms of eigenvectors of Gram matrices for special cases of the problem under consideration was described in [18, 19].

In the case under consideration, one can simply take m maximum singular values of the matrix \mathbf{U} , since it was shown in [23] that the maximum eigenvalues of the matrices $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$ and $\mathbf{U}^T\mathbf{U}$ correspond to the signal components, and the remaining smaller eigenvalues correspond to the noise.

So, the unknown matrix, \mathbf{Q} , can be found using the structured data matrix (3). The matrix equation can be written in the next form

$$\begin{cases} (u_{11}, \dots, u_{1M})\mathbf{Q} = [1, \dots, 1]^T = 1 = \mathbf{u}_1 \mathbf{Q}; \\ (u_{21}, \dots, u_{2M})\mathbf{Q} = [e^{s_1}, \dots, e^{s_M}]^T = z = \mathbf{u}_2 \mathbf{Q}; \\ (u_{31}, \dots, u_{3M})\mathbf{Q} = [e^{2s_1}, \dots, e^{2s_M}]^T = z \otimes z = \mathbf{u}_3 \mathbf{Q}; \\ \vdots \\ (u_{L+1,1}, \dots, u_{L+1,M})\mathbf{Q} = [e^{s_1^L}, \dots, e^{s_M^L}]^T = z \otimes^L = \mathbf{u}_{L+1} \mathbf{Q}, \end{cases} \quad (7)$$

where $z \otimes^p = \underbrace{z \otimes z \otimes \dots \otimes z}_{p+1}$ is the p -tuple Hadamard product of z , and \mathbf{u}_t is the vector of t -th components of the left singular vectors. Using (7), one can write:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 \mathbf{Q} = 1; \\ \mathbf{u}_3 \mathbf{Q} = (\mathbf{u}_2 \mathbf{Q}) \otimes^2; \\ \mathbf{u}_4 \mathbf{Q} = (\mathbf{u}_2 \mathbf{Q}) \otimes^3; \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{L+1} \mathbf{Q} = (\mathbf{u}_2 \mathbf{Q}) \otimes^L. \end{cases} \quad (8)$$

The number of unknowns in the matrix \mathbf{Q} , is $m \times m$. The last relationships (8) allows one to obtain the following:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 \mathbf{Q} = 1; \\ \mathbf{u}_3 \mathbf{Q} = (\mathbf{u}_2 \mathbf{Q}) \otimes (\mathbf{u}_2 \mathbf{Q}); \\ \mathbf{u}_4 \mathbf{Q} = (\mathbf{u}_2 \mathbf{Q}) \otimes (\mathbf{u}_3 \mathbf{Q}); \\ \mathbf{u}_5 \mathbf{Q} = (\mathbf{u}_3 \mathbf{Q}) \otimes (\mathbf{u}_3 \mathbf{Q}); \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{2L} \mathbf{Q} = (\mathbf{u}_{2L-2} \mathbf{Q}) \otimes (\mathbf{u}_{2L-1} \mathbf{Q}), \end{cases} \quad (9)$$

which is the system of linear and quadratic equations. Estimating \mathbf{Q} from (9) with a use of any appropriate optimization method, we can find the vector z from the second equation of (7) and estimate amplitudes in (4). In case of low SNR, convergence to a local extremum may occur, and solution will be unstable with a certain probability, however, this probability is decreasing with increasing number of data samples or SNR.

IV. SIMULATION RESULTS

The performance of proposed method was examined using the computer simulation. A comparative study of the proposed method and the fast Fourier transform (FFT) method was carried out in application to the measurement of acceleration projections on the coordinate axis in a system associated with a helicopter-type flying aircraft. All the necessary software was prepared in the MATLAB media. At the first stage the authors compare the standard deviation error of frequency estimators vs SNR obtained by the proposed MLM method and FFT technique. The typical

results are shown in Fig. 1. As it can be seen from the graphs, the advantages of the proposed method are rather significant.

At the second stage the authors tested the capabilities of both methods to track changes in acceleration projections over time. For this, the "true" values of the projections were set by the following dependencies:

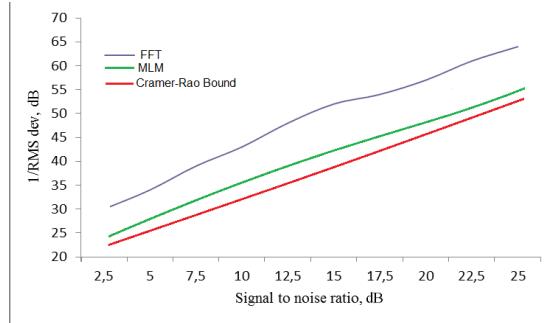


Fig. 1. Determining frequency using Fourier transform

$$u_i(t) = A_i \sin(2\pi f t + \varphi) + \xi_i(t) \quad i = 1, 2, 3, \quad (10)$$

where A_i are the amplitudes of the corresponding acceleration components; f and φ are the frequency and phase to be estimated respectively; ξ_i is the sample of AWGN with unknown variance δ^2 . The "true" parameters of the model (10) were set to be: $f = 5.1$ Hz ($\omega = 2\pi f = 32.0442$); $\varphi = 0.55$; $A_x = 0.435$; $A_y = 0.5$; $A_z = 0.55$ (in relative units).

It turned out that the standard deviation of the errors in the estimates of the frequency and phase from the MLM are $RMS_f = 0.211$ Hz and $RMS_\varphi = 0.0422$. The standard deviation of the errors of the same parameters by the FFT method was 0.502 and 0.1032, respectively. Therefore, the authors conclude that the use of proposed estimation method based on data matrix factorization combined with MLM gives more accurate estimators concerning the considered problem.

At the final stage, the effectiveness of the proposed method was checked in comparison with the FFT when processing real experimental data. The initial data were obtained during tests of a small unmanned helicopter. In the experiments, the real change in the acceleration components a_x , a_y , and a_z was measured with a precision accelerometer, the readings of which were taken as a standard.

Fig. 2, 3, and 4 depict the real change in time of corresponding acceleration components (measured by the standard device) as well as its estimators taken by the named methods.

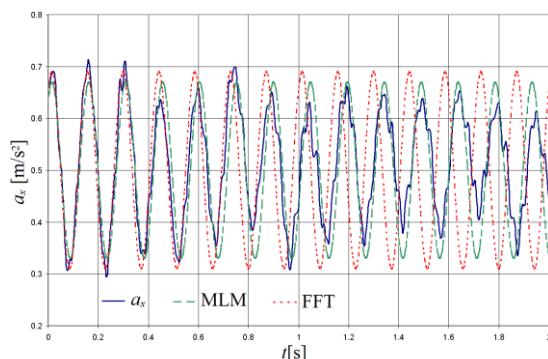


Fig. 2. Estimate the frequency and phase of the a_x component

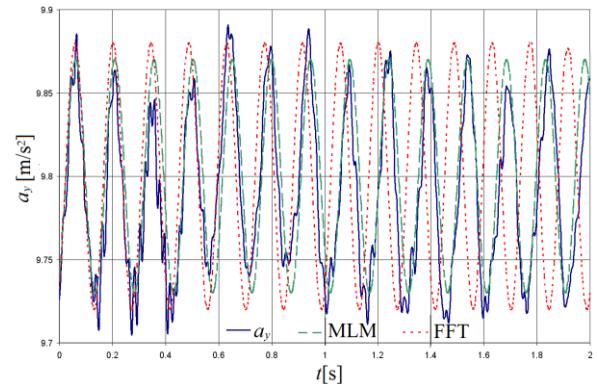


Fig. 3. Estimate the frequency and phase of the a_y component

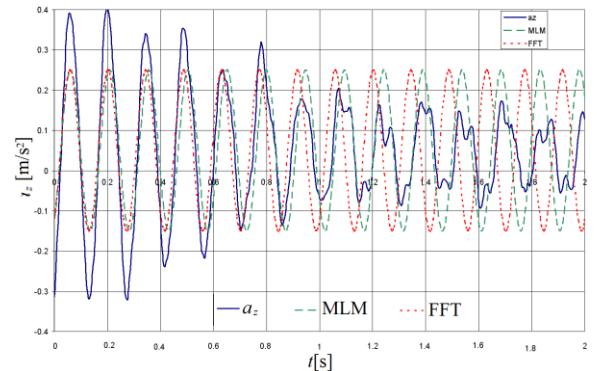


Fig. 4. Estimate the frequency and phase of the a_z component

As can be seen from the above graphs, the FFT estimates of all acceleration components are biased. This indicates that the estimation of the frequency by this method is taught not to be sufficiently accurate. Moreover, the bias increases over time. This is due to the limited resolution of the FFT in the frequency domain and the known phenomenon of spectral leakage [24, 25]. This, in turn, leads to the impossibility of effective suppression of interference in the measured signal associated with the rotation of the main rotor of the helicopter-type aircraft.

On the contrary, the frequency estimates based on the MLM in this case are more accurate. Therefore, there is no bias in the estimates of the acceleration components relative to the true values, although the estimates of the amplitudes of the acceleration projections on the x , y , and z axes are not accurate enough. Nevertheless, the obtained estimation results make it possible to effectively suppress interference signals caused by the rotation of the main rotor of a helicopter-type aircraft.

The proposed estimation method is even more effective when trying to suppress interfering signals from the screws of the quadrotor helicopter. There are already four rotating screws, and their frequencies can be very close, but different. In this case, the method based on the data matrix factorization can give significantly more accurate results of estimating the parameters of the mixture of parasitic signals.

V. CONCLUSION

The paper proposes technique for estimating the parameters of a quasi-harmonic signal generated by a main rotor of a helicopter-type aircraft, based on the MLM. Rotor vibrations are the main source of interference in helicopter inertial sys-

tems. An important feature of this interference is the constancy of its frequency and phase, and therefore, having identified these parameters, it is possible to suppress the interfering signal, and thereby increase the accuracy of the inertial system installed on the helicopter.

The MLM is based on an iterative procedure for solving the resulting bilinear equations. It was shown that the proposed method has an advantage over other methods used in practice. The paper provides experimental data and simulation results.

REFERENCES

1. *Ermakov R.V., Popov A.N., Scripal E.N., et al.* Methods for testing and test results of inertial sensors intended for operation in helicopter-type aircraft // Proc. of the 24th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017 – St.Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2017. – P. 335-338.
2. *Skorobogatov V.V., Grebennikov V.I., Kalihman L.Y., et al.* The results of experimental testing of a thermally invariant quartz pendulum accelerometer with digital feedback and reprogrammable measurement range // Proc. of the 23rd Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016. – St.Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2016. – P. 116-120.
3. *Kalihman L., Kalihman D., Polushkin A., et al.* Technique for arranging of miniature packs of high performance rate gyros for space vehicles on the basis of floating rate - of turn gyros and modern element base // Proc. of the 14th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, ICINS 2007. – St.Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2007. – P. 33-40.
4. *Händel P.* Properties of the IEEE-STD-1057 four-parameter sine wave fit algorithm // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2000. – Vol. 49, No. 6. – P. 1189-1193.
5. *Ramos P.M., Silva F., Cruz S.A.* Improving sine-fitting algorithms for amplitude and phase measurements // Proc. of the XVII IMEKO World Congress. – Croatia, 2003. – P. 614-619.
6. *Stoica P., Moses R.* Introduction to Spectral Analysis. – Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997. – 427 p.
7. *Bertocco M., Offeli C., Petri D.* Analysis of damped sinusoidal signals via frequency-domain interpolation algorithm // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 1994. – Vol. 43, No. 2. – P. 245-250.
8. *Tufts D.W., Kumaresan R.* Estimation of Frequencies of Multiple Sinusoids: Making Linear Prediction Perform Like Maximum Likelihood // Proc. of the IEEE. – 1982. – Vol. 70, No. 9. – P. 975-989.
9. *Micka O.J., Weiss A.J.* Estimating frequencies of exponentials in noise using joint diagonalization // IEEE Trans. on Signal Processing, 1999. – Vol. 47, No.2. – P. 341-348.
10. *Li Y., Liu K., Razavilar J.* A Parameter Estimation Scheme for Damped Sinusoidal Signals Based on Low-Rank Hankel Approximation // IEEE Trans. on Signal Processing. – 1997. – Vol. 45, No. 2. – P. 481-486.
11. *Roy R., Kailath T.* ESPRIT Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques // IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1989. – Vol. 37, No.7. – P. 984-995.
12. *Hua Y., Sarkar T.* Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise // IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1990. – Vol. 38, No.4. – P. 814 - 824.
13. *Sarkar T., Pereira O.* Using the Matrix Pencil Method to Estimate the Parameters of a Sum of Complex Exponentials // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 1995. – No.1. – P. 48-55.
14. *Marple S.L.Jr.* Digital Spectral Analysis: Second Edition – Courier Dover Publications, 2019. – Iss. 20. – Technology & Engineering. – 432 p. ISBN - 048678052X, 9780486780528.
15. *So H.C., Chan K.W., Chan Y.T., Ho K.C.* Linear Prediction Approach for Efficient Frequency Estimation of Multiple Real Sinusoids: Algorithms and Analyses // IEEE Trans. on Signal Processing. – 2005. – Vol. 53, No. 7. – P. 2290-2305.
16. *Wu R.C., Chiang C.T.* Analysis of the exponential signal by the interpolated DFT algorithm // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. – 2010. – Vol. 59, No. 12. – P. 3306-3317.
17. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 336 с.
18. *Moutchkaev A.S., Kong S.-H., L'vov A.A.* Parameter estimation of superimposed sinusoids by data matrix subfactorization: theory and algorithm // Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov: IEEE, 2016. – Vol. 2. – P. 442-447.
19. *Moutchkaev A.S., Kong S.-H., L'vov A.A.* Parameter estimation of superimposed sinusoids by data matrix subfactorization: analysis and results // Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov: IEEE, 2016. – Vol. 2. – P. 448-455.
20. *Львов А.А., Серанова А.А., Ермаков Р.В., Мучкаев А.С.* Сравнение методов оценивания параметров квазигармонических сигналов // Радиотехника. – 2019. – № 8 (12). – С. 88-95. DOI 10.18127/j00338486-201908(12)-14.
21. *L'vov A., Seranova A., Ermakov R., et al.* Comparison of Methods for Parameter Estimating of Superimposed Sinusoids // Proc. of the Int. Conf. on Information Technologies: Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 337: Recent Research in Control Engineering and Decision Making. – Springer Nature Switzerland, 2020. – P. 140-151.
22. *L'vov A.A., Semenov K.V.* A method of calibrating an automatic multiprobe measurement line // Measurement Techniques. – 1999. – Vol. 42, Iss. 4. – P. 357-365.
23. *Львов А.А., Серанова А.А., Ермаков Р.В., Мучкаев А.С.* Сравнение методов оценивания параметров квазигармонических сигналов // Радиотехника. – 2019. – № 8 (12). – С. 88-95.
24. *Oppenheim A.V., Schafer R.W., Buck J.R.* Discrete-Time Signal Processing. – Prentice-Hall, 1999. – 870 p.
25. *Moon T.K., Stirling W.C.* Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing. – Prentice Hall, 1999. – 937 p.

Блок измерителей линейного ускорения с цифровым управлением и новыми функциональными возможностями для российских транспортных кораблей МКС

Депутатова Екатерина Александровна
Филиал ФГУП «НПЦАП» –
«ПО «Корпус»
Саратов, Россия
deputatova@bk.ru

Калихман Дмитрий Михайлович
Филиал ФГУП «НПЦАП» –
«ПО «Корпус»
Саратов, Россия
lidkalihaman@yandex.ru

Калихман Лариса Яковлевна
Филиал ФГУП «НПЦАП» –
«ПО «Корпус»
Саратов, Россия
lidkalihaman@yandex.ru

Нахов Сергей Федорович
Филиал ФГУП «НПЦАП» –
«ПО «Корпус»
Саратов, Россия
lidkalihaman@yandex.ru

Николаенко Артем Юрьевич
Филиал ФГУП «НПЦАП» –
«ПО «Корпус»
Саратов, Россия
lidkalihaman@yandex.ru

Скоробогатов Вячеслав Владимирович
Филиал ФГУП «НПЦАП» –
«ПО «Корпус»
Саратов, Россия
lidkalihaman@yandex.ru

Аннотация. Доклад посвящен разработке блока измерителей линейного ускорения – прибора БИЛУ для систем управления российских транспортных кораблей Международной космической станции (МКС), а именно, для космических кораблей (КК) «Союз-МС» и «Прогресс-МС» на этапе старта, стыковки и расстыковке с МКС, входа в плотные слои атмосферы и выдачи главной команды на отделение КК «Союз» (для пилотируемого полета) вплоть до раскрытия парашютов спускаемого аппарата. В докладе кратко рассматривается история создания прибора в рамках модернизации транспортной системы по программе МКС, создания цифровой системы управления измерительным каналом прибора БИЛУ и существенного расширения его функциональных возможностей. Прибор прошёл лётные испытания в августе – сентябре 2019 года и с 2022 года становится штатным прибором, пришедшим на смену аналогичному прибору с аналоговой системой управления. В 2021 году в СГТУ им. Гагарина Ю.А. вышла книга «Опыт проектирования и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления» с одноименным авторским коллективом, как и в предлагаемом докладе, где подробно описана конструкция прибора и его функциональные возможности.

Annotation. The report is devoted to the development of a unit of linear acceleration meters – the “BILU” device for control systems of Russian transport spacecraft of the International Space Station (ISS), namely, for Soyuz-MS and Progress-MS. The device operates during launch, ISS docking and undocking stages, atmosphere entry, and during the issuing of prime command for Soyuz decoupling (for manned flight missions) down to the descent vehicle parachute deployment. The paper briefly discusses the history of device development, including creation of the digital control system of the BILU device measuring channel, as well as the problem of expansion of its functional capabilities as part of the ISS program for modernization of the transport system. The device passed flight tests in August and September 2019 and will

become a regular device to replace a similar one with an analog control system in 2022. In 2021, the book “Design and Manufacture of Units of Quartz Pendulum Accelerometers with Analog and Digital Control Systems” by the same team of authors was published in the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov in 2021. The book provides detailed description of the device design and functionality.

Ключевые слова: кварцевый маятниковый акселерометр, система управления, широтно-импульсный модулятор, управляющий процессор, смещение нуля, масштабный коэффициент, цифровой регулятор.

Keywords: quartz pendulum accelerometer, control system, pulse width modulator, control processor, zero bias, scale factor, digital controller.

I. ВВЕДЕНИЕ

С 2002 года по техническому заданию РКК «Энергия» предприятием ПО «Корпус» разработан, изготавливается и поставляется в РКК «Энергия» шестиканальный прибор БИЛУ, построенный на кварцевых маятниковых акселерометрах и преобразователях «напряжение-частота», предназначенный для работы в системе управления (СУ) спускаемого аппарата корабля «Союз-МС», в том числе и на участке спуска, обеспечивающий измерение линейного ускорения движения спускаемого аппарата с высокой точностью и надежностью.

Разработка цифровой обратной связи с учетом совершенствования элементной базы цифровой электроники ведется на предприятии в течение ряда лет, это позволило разработчикам ПО «Корпус» перейти к применению микроконтроллеров в системе обратной связи кварцевых маятниковых акселерометров и отработать технические решения с компенсацией температурных погрешностей алгоритмическим способом внутри микроконтроллера [1–4].

Результаты докладывались на международных и отраслевых конференциях [5, 7–11, 14, 20, 23, 25], получены патенты [6, 13, 15–17], опубликованы статьи в научных журналах [12, 18, 19, 21, 24, 25] и в 2018 году одним из авторов настоящего доклада защищена кандидатская диссертация [22].

Настоящий доклад посвящён итогам разработки прибора БИЛУ с цифровой обратной связью каждого измерительного канала и результатам летных испытаний прибора в составе пилотируемого корабля «Союз МС-14».

II. НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП РАЗРАБОТКИ

По техническому заданию РКК «Энергия» предпрятием ПО «Корпус» был разработан и уже в течение 19 лет изготавливается и поставляется в РКК «Энергия» шестиканальный прибор БИЛУ, построенный на кварцевых маятниковых акселерометрах и преобразователях «напряжение-частота», предназначенный для работы в системе управления (СУ) спускаемого аппарата корабля «Союз-МС», в том числе и на участке спуска, обеспечивающий измерение линейного ускорения движения спускаемого аппарата с высокой точностью и надежностью, обусловленной ориентацией осей чувствительности прибора по образующей конуса, изображённой на рис. 1.

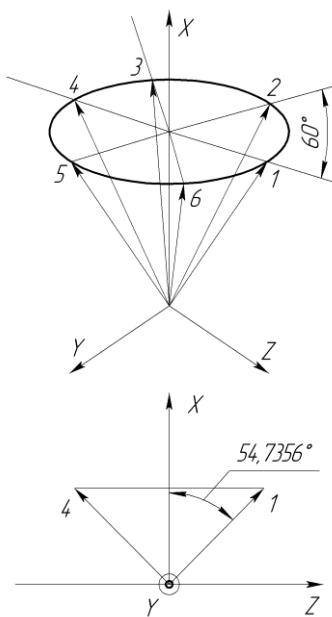


Рис. 1. Направление осей чувствительности относительно приборной системы координат OXYZ

Матрица направляющих косинусов, осуществляющая связь осей чувствительности каждого измерительного канала с приборной декартовой системой координат имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ Z_1^2 & \sin \beta'_1 & -\cos \beta'_1 \cdot \sin \alpha_1 & \cos \beta'_1 \cdot \cos \alpha_1 \\ Z_2^2 & \sin \beta'_2 & -\cos \beta'_2 \cdot \sin \alpha_2 & \cos \beta'_2 \cdot \cos \alpha_2 \\ Z_3^2 & \sin \beta'_3 & -\cos \beta'_3 \cdot \sin \alpha_3 & \cos \beta'_3 \cdot \cos \alpha_3 \\ Z_4^2 & \sin \beta'_4 & -\cos \beta'_4 \cdot \sin \alpha_4 & \cos \beta'_4 \cdot \cos \alpha_4 \\ Z_5^2 & \sin \beta'_5 & -\cos \beta'_5 \cdot \sin \alpha_5 & \cos \beta'_5 \cdot \cos \alpha_5 \\ Z_6^2 & \sin \beta'_6 & -\cos \beta'_6 \cdot \sin \alpha_6 & \cos \beta'_6 \cdot \cos \alpha_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

В матрице A углы β'_i ($i = 1–6$) – углы, дополнительные к углу полурасстояния конуса, т.е. $\beta'_i = 35^\circ 15' 52''$. В матрицу A нужно вносить фактические значения данного угла, включающие в себя погрешности выставки и изготовления корпуса прибора. Углы α_i ($i = 1–6$) – фактические значения углов, для которых теоретические значения равны $0 + i \times 60^\circ$. При вычислении реальной матрицы A используют фактическое значение паспортизованного угла α_i , при этом $\sin \alpha_i$ и $\cos \alpha_i$ учитывают с получающимся знаком и вносят в выражение (1). Фактические значения углов α_i и β_i измеряются при изготовлении каждого прибора БИЛУ и вносятся в его формуляр для использования как при определении значений параметров на заводе-изготовителе, так и при эксплуатации прибора.

Измерение вектора линейного ускорения может осуществляться любой из 20-ти «троек» измерительных каналов прибора, выбор «тройки» осуществляется системой управления на основе специальных алгоритмов, при этом прибор обеспечивает работу при трех отказавших каналах. Прибор был разработан в 2002 г. Решение о переходе на использование кварцевых маятниковых акселерометров было принято РКК «Энергия» с учетом перспективности использования таких измерителей ввиду их малых габаритов и высокой точности.

Кварцевые маятниковые акселерометры с аналоговой электрической обратной связью, реализуемой в малогабаритном усилителе, выполняемом в виде модуля, встраиваемого в корпус акселерометра, разработаны и изготавливаются многими фирмами (В США – фирмой «Honeywell»; в России: Московским институтом электромеханики и автоматики – акселерометры АК-6, АК-15, ФГУП «ПО Корпус» (г. Саратов) – акселерометр КХ67-041 и др.).

Прибор БИЛУ в составе СУ космического корабля «Союз-МС» предназначен для решения следующих задач:

1) Для точной отработки импульсов 2–25 м/с коррекции орбиты. Ошибка отработки корректирующего импульса накапливается в течение суток (в процессе обеспечения движения стыкуемых кораблей по одинаковой орбите) до измерения текущей траектории и отработки следующего корректирующего импульса.

2) Для обеспечения точной отработки импульса торможения (115–128 м/с) для схода с орбиты.

При тяге силовых корректирующих двигателей 0.5 м/с² время работы при действии импульса 128 м/с составляет 256 с. При тяге 0.08 м/с² менее мощных корректирующих двигателей время работы при действии импульса 128 м/с составляет 1600 с.

Это определяет требование $1 \cdot 10^{-4}$ г к временной стабильности нулевого сигнала. Если случайная составляющая нулевого сигнала БИЛУ от запуска к запуску составляет $1 \cdot 10^{-4}$ г или 1 мм/с², то за время работы 256 с ошибка составит 0.256 м/с, а за 1600 с – 1.6 м/с. Указанная ошибка по линейной скорости приводит к ошибке по точке входа в атмосферу и, соответственно, к ошибке в зоне посадки спускаемого аппарата.

3) Для обеспечения расчетного движения спускаемого аппарата на участке спуска. По результатам измерения каналами прибора БИЛУ перегрузки по осям X , Y , Z

изделия регулируется отношение перегрузки в боковых и продольном направлениях, чем обеспечивается точность зоны посадки.

На участке спуска высокие требования предъявляются к масштабным коэффициентам измерительных каналов, которые должны сохранять значения, записанные в формуляр прибора при его изготовлении и внесенные в память бортового вычислителя. Временная стабильность масштабного коэффициента не должна превышать $\pm 0,02\%$.

Высокие требования к стабильности нулевого сигнала и масштабного коэффициента прибора должны сохраняться в диапазоне рабочих температур от 0 до 40°C .

Кварцевые акселерометры в силу свойств кварца могут сохранять долговременную стабильность характеристик, поэтому применение для решения указанных задач управления в качестве измерителей линейного ускорения кварцевых маятниковых акселерометров является абсолютно обоснованным техническим решением. Но одновременно с таким полезным свойством кварцевые акселерометры обладают особенностями, усложняющими их применение, а именно, температурная зависимость основных характеристик – нулевого сигнала и масштабного коэффициента носит ярко выраженный нелинейный характер.

Для обеспечения стабильности значений нулевого сигнала и масштабного коэффициента во всем температурном диапазоне на весь период эксплуатации в приборе БИЛУ, разработанном на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговым усилителем обратной связи и преобразователях «напряжение-частота», был разработан и запатентован аппаратный метод компенсации [6] температурных зависимостей нулевого сигнала и масштабного коэффициента путем подачи на вход токовых ключей и интегратора преобразователя «напряжение-частота» специально формируемых напряжений, зависящих от температурных коэффициентов нулевого сигнала и масштабного коэффициента и текущего значения температуры в специальной оболочке, в которой размещались акселерометры.

Реализация аппаратного способа компенсации указанных температурных зависимостей возможна только на линейном участке температурных характеристик нулевого сигнала и масштабного коэффициента кварцевых акселерометров, которая у них имеется в диапазоне температур от $+30^{\circ}\text{C}$ и выше. Поэтому в приборе был реализован релейный регулятор температуры внутри оболочки, в которой был размещен каждый акселерометр, а в каждый измерительный канал введен усилитель терморегулирования, обеспечивающий температуру внутри оболочки не ниже $+30^{\circ}\text{C}$. Обеспечение высоких требований к стабильности нулевого сигнала и масштабного коэффициента потребовало применения в преобразователе «напряжение-частота» источника опорного напряжения со стабильностью напряжения $0,0005\%$, токовых ключей с собственным сопротивлением в доли Ом и такой же временной стабильностью этого сопротивления, быстродействующего операционного усилителя с высокими точностными характеристиками в качестве интегратора.

В 2000 г., в период разработки прибора, отечественной элементной базы с такими характеристиками не было, вследствие чего пришлось использовать элементную базу производства США, например, источник опорного напряжения AD780BNZ, токовые ключи ADG723BRMZ, операционный усилитель OPA 627SM в качестве интегратора.

В настоящее время ряд российских и белорусских предприятий выпускают электрорадиоизделия (ЭРИ) – аналоги импортных источников опорного напряжения и токовых ключей. Быстродействующих операционных усилителей с параметрами, близкими к параметрам операционного усилителя OPA 627SM, пока нет.

Поставленная Правительством РФ задача выполнения импортозамещения в приборах для систем управления изделием «Союз-МС» не могла быть решена путем простой замены импортной элементной базы на отечественные аналоги при сохранении реализованных в приборе БИЛУ технических решений.

Учитывая научно-технический задел, накопленный предприятием по разработке цифровой обратной связи, а также, учитывая разработку отечественного микроконтроллера 1986ВЕ93У, позволяющего реализовать алгоритмы цифровой обратной связи и алгоритмическую компенсацию нелинейной температурной зависимости нулевого сигнала и масштабного коэффициента кварцевого маятникового акселерометра, было принято совместное решение ПО «Корпус» и ПАО РКК «Энергия» выполнить модернизацию прибора БИЛУ, находящегося в эксплуатации в системе управления корабля «Союз-МС», путем внедрения цифровой обратной связи при использовании только отечественной элементной базы.

III. РАЗРАБОТКА АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЦИФРОВЫМ УСИЛИТЕЛЕМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Наиболее оптимальным решением была признана структура цифрового усилителя обратной связи (ЦУОС) с ШИМ-управлением током датчика момента [19, 22, 24], поскольку в этом случае исключается из структуры цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), к которому должны быть предъявлены высокие требования для обеспечения сохранения достигнутых точностей прибора БИЛУ и который трудно выбрать из изготавливаемых отечественной промышленностью ЦАП.

Важным моментом при построении системы цифровой обратной связи (ЦОС) является выбор величины периода дискретности работы T_0 . В моменты времени nT_0 ($n = 1, 2, 3 \dots$) обновляется вычисленная цифровой обратной связью величина управляющего сигнала и сохраняется неизменной в течение времени $nT_0 < 1 < (n+1)T_0$.

Для разработанной ЦОС был реализован период дискретизации $T_0 = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, т.е. частота дискретизации 5 кГц . За каждый период дискретизации цифровой усилитель обратной связи модернизированного прибора БИЛУ выполняет следующие операции:

- по сигналу с выхода емкостного датчика угла чувствительного элемента акселерометра формирует цифровую информацию о величине перемещений маятника чувствительного элемента;

- вычисляет величину управляющего сигнала и формирует соответствующие ему широтно-модулированные импульсы тока датчика момента;
 - вычисляет величину температурной поправки систематической составляющей нулевого сигнала измерительного канала;
 - вычисляет величины температурных поправок масштабных коэффициентов для положительных и отрицательных ускорений;
 - по величине управляющего сигнала с учетом вычисленных поправок формирует выходную информацию о действующем по оси чувствительности акселерометра ускорении;
 - формирует корректирующие импульсы тока датчика момента, необходимые для линеаризации масштабного коэффициента.

IV. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЦУОС

Принципы построения акселерометра с цифровым усилителем обратной связи и ШИМ-управлением током датчика момента, а также вопросы об обеспечении динамической устойчивости работы системы управления прибором докладывался авторами на международных конференциях [7–11, 14, 20, 23, 25] и нашли отражение в целом ряде научных работ [12, 18, 19, 21, 22, 24]. Поэтому, вследствие ограниченности объёма доклада кратко остановимся на основных моментах, характеризующих работу прибора БИЛУ с цифровой системой управления измерительным каналом и результатов летных испытаний.

A. Устройство цифрового усилителя обратной связи

Цифровой усилитель обратной связи построен на отечественной элементной базе и представляет собой совокупность аналогового предварительного усилителя, цифрового вычислительного устройства и переключателя тока датчика момента чувствительного элемента (ЧЭ). Структурная схема кварцевого маятникового акселерометра (КМА) с ЦУОС публиковалась ранее и приведена на рис. 2.

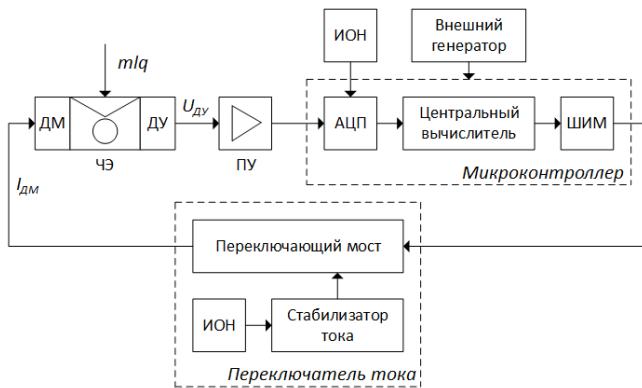


Рис. 2. Структурная схема КМА с ЦУОС

На рис. 2 введены обозначения: ЧЭ – чувствительный элемент; ДМ – датчик момента; ДУ – датчик угла; mlq – входное ускорение, приведённое к маятниковой оси акселерометра; $U_{ДУ}$ – сигнал датчика угла; ПУ – предваритель-

ный усилитель; *ИОН* – источник опорного напряжения; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь; *ШИМ* – широтно-импульсный модулятор; $I_{ДМ}$ – ток датчика момента.

В качестве цифрового вычислительного устройства применяется микроконтроллер производства ПКК «Миландр» (г. Зеленоград), в состав которого в том числе входят два АЦП и три таймера-счетчика с возможностью работы в режиме ШИМ. Работа цифрового усилителя организована следующим образом: сигнал датчика угла после предварительного усиления поступает на вход АЦП микроконтроллера, на основе показания АЦП дискретный регулятор вычисляет управление, которое затем в блоке ШИМ преобразуется в длительность стабилизированных по амплитуде широтно-модулированных импульсов тока датчика момента, формируемых блоком «Переключатель тока».

Импульсы, поступающие с выхода ШИМ на вход переключателя тока (усилителя мощности), имеют строго прямоугольную форму. В стабилизаторе тока применяют прецизионную электронную компонентную базу для обеспечения с высокой стабильностью постоянства амплитуды тока в импульсе I_a для обеспечения высокостабильного среднего за период дискретизации T_0 значения тока, пропорционального измеряемому линейному ускорению. Однако, индуктивность датчика момента, наличие переходных процессов в стабилизаторе тока приводят к отклонению реальной формы импульса тока от прямоугольной.

В переключателе тока имеет место временная задержка, что приводит к перерегулированию и дополнительному отклонению формы импульса от прямоугольной. Переходные процессы по переднему и заднему фронтам рабочего импульса $\tau_{раб}(nT_0)$, если не принять дополнительных мер, приводят к отклонению площади реального импульса от площади идеального импульса, которая должна быть равна $I_a \cdot \tau_{раб}(nT_0)$, т.е. к отклонению фактической величины среднего значения тока за период дискретизации от расчетного значения и, как следствие, к нелинейности масштабного коэффициента акселерометра. Было разработано и запатентовано техническое решение [16, 17], реализованное в модернизированном приборе БИЛУ, которое позволило обеспечить компенсацию искажений формы рабочих импульсов и обеспечить линейность масштабного коэффициента прибора в пределах $\pm 0,01\%$. Акселерометр с ЦУОС как система автоматического управления подробно рассмотрен в работе [24]. Отметим кратко, что были исследованы различные типы цифровых регуляторов, обеспечивающих динамическую устойчивость системы автоматического управления с хорошими показателями качества: запас по модулю – не ниже 11, 2 дБ, запас по фазе – не ниже $45,6^\circ$, показатель колебательности – не выше 1,42, перерегулирование – не выше 31, 2 %, полоса пропускания – около 1 кГц. Отметим, что динамические характеристики прибора с ЦУОС получились не хуже, а по некоторым параметрам – лучше, нежели у аналогового варианта акселерометра [24].

B. Структура ПМО

Управляющая программа контроллера ЦУОС разработана на языке «C» и предназначена для работы в составе отечественного микроконтроллера 1986ВЕ93У.

Управляющая программа контроллера ЦУОС выполняет следующие функции:

- производит инициализацию аналоговых модулей и периферии контроллера, в том числе таймера 1 для формирования сигнала питания датчика угла (ДУ), таймера 2 для обеспечения работы ЦУОС в заданном режиме («ШТАТНЫЙ», «НАСТРОЙКА», «ПРОВЕРКА»), таймера 3 для формирования импульсов интерфейса «Унитарный код» и сторожевого таймера, предназначенного для перезагрузки контроллера в случае «зависания» программы;
- обеспечивает работу обратной связи – измерение сигнала ДУ, вычисление управления, конфигурирование таймера 2 для формирования ШИМ сигнала;
- принимает и передает данные посредством контроллера UART, логические уровни которого могут быть преобразованы, например, в уровне стандарта RS-232 для связи с компьютером;
- считывает и записывает данные в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) контроллера.

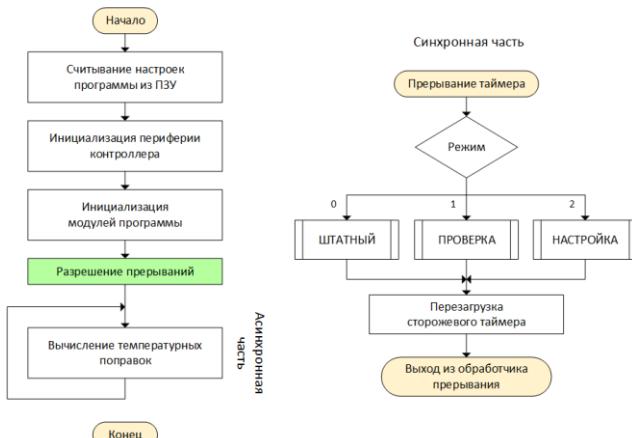


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы программы контроллера ЦУОС

Кратко работу программы можно описать следующим образом: после запуска микроконтроллера управляющая программа считывает из его ПЗУ настройки, которые применяются для последующей инициализации периферии контроллера (АЦП, таймеров, контроллера UART) и модулей программы, например, модуля коррекции температурных зависимостей прибора. Следует отметить, что указанные операции выполняются один раз после подачи питания на микроконтроллер, а работа прибора начинается после разрешения прерываний. Алгоритм работы программы выполняется циклически и состоит из двух частей – асинхронной и синхронной. Асинхронная часть алгоритма выполняется в свободное процессорное время и включает в себя вычисление температурных поправок. Синхронная часть, в свою очередь, выполняется в обработчике прерывания от таймера и необходима для поддержки одного из трех режимов работы цифрового усилителя: «ШТАТНЫЙ», «ПРОВЕРКА» или «НАСТРОЙКА», которые представлены на блок-схеме (рис. 3) в виде подпрограмм. Перед выходом из обработчика прерывания производится перезагрузка сторожевого таймера.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРА БИЛУ

22 августа 2019 года космический корабль «Союз МС-14» (изделие 11Ф732 № 743) с роботом «Фёдором» на борту стартовал с космодрома «Байконур». В составе системы управления был применён ряд новых приборов, а одной из целей автономных лётных испытаний была проверка модернизированной системы аварийного спуска и штатной работы всех систем управления космическим кораблём, в состав одной из которых входил модернизированный прибор БИЛУ. Полёт завершился 7 сентября 2019 года с положительными результатами. После завершения полёта космического корабля «Союз МС-14» прибор БИЛУ был возвращён на предприятие-изготовитель – ПО «Корпус» для оценки сохранения после лётных испытаний значений параметров прибора, записанных в формуляр при его изготовлении, и анализа изменений параметров, если таковые произошли. Прибор, прошедший летные испытания, транспортировался в составе изделия на Байконур, подвергался одновременному комплексному воздействию ударов, вибраций и других дестабилизирующих факторов. Можно считать, что прибор прошел повторные отработочные испытания при одновременном воздействии всех эксплуатационных возмущений, заданных в техническом задании, проверки на каждое из которых прибор проходил при проведении отработочных испытаний на предприятии – изготовителе.

Ниже приведем некоторые полученные результаты, подробнее с которыми можно ознакомиться в [25].



Рис. 4. Изменение масштабного коэффициента после летних испытаний по отношению к формулярному, %

Согласно рис. 4: допуск $\pm 0,02\%$; $M = -0,000729188\%$; $\sigma = 0,002894551\%$; $M \pm 3\sigma = [-0,009412842 \div 0,007954467]\%$; $M \pm 2\sigma = [-0,00651829 \div 0,005059915]\%$; $M \pm \sigma = [-0,003623739 \div 0,002165364]\%$.

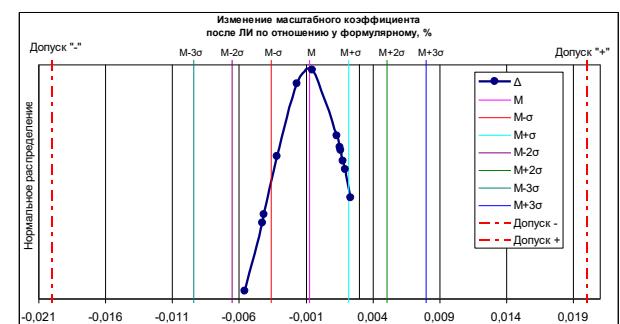


Рис. 5. Изменение статической составляющей нулевого сигнала после летних испытаний по отношению к формулярному, г

Согласно рис. 5: допуск $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ g; $M = 0,104275 \cdot 10^{-4}$ g; $\sigma = 0,751047 \cdot 10^{-4}$ g; $M \pm 3\sigma = [-2,14887 \cdot 10^{-4} \div 2,35742 \cdot 10^{-4}]$ g; $M \pm 2\sigma = [-1,39782 \cdot 10^{-4} \div 1,60637 \cdot 10^{-4}]$ g; $M \pm \sigma = [-0,646772 \cdot 10^{-4} \div 0,855322 \cdot 10^{-4}]$ g.

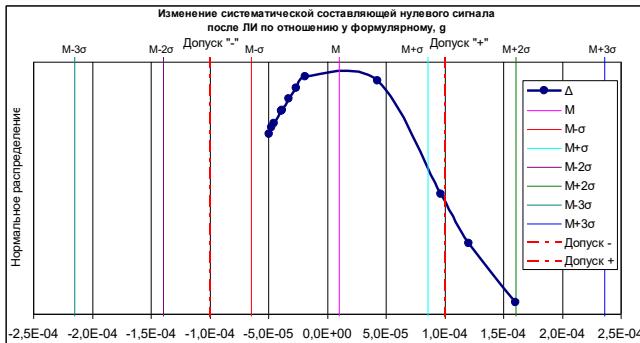


Рис. 6. Изменение случайной составляющей нулевого сигнала от запуска к запуску после летных испытаний по отношению к формулярному, g

Согласно рис. 6: допуск по ТУ $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ g; $M = -0,0160083 \cdot 10^{-4}$ g; $\sigma = 0,0582592 \cdot 10^{-4}$ g; $M \pm 3\sigma = [-0,190786 \cdot 10^{-4} \div 0,158769 \cdot 10^{-4}]$ g; $M \pm 2\sigma = [-0,132527 \cdot 10^{-4} \div 0,10051 \cdot 10^{-4}]$ g; $M \pm \sigma = [-0,0742675 \cdot 10^{-4} \div 0,0422509 \cdot 10^{-4}]$ g.

Как следует из приведённых выше результатов после лётных испытаний основные параметры прибора БИЛУ остались в поле допуска, как и до лётных испытаний.

Вследствие неортогональной ориентации осей чувствительности шести измерительных каналов БИЛУ, как это показано на рис. 1, для контроля прибора введен комплексный параметр, зависящий, с одной стороны, от погрешностей основных параметров, вносимых в формуляр прибора, – масштабного коэффициента, нулевого сигнала и углов ориентации осей чувствительности, и с другой стороны, определяемый по известной для каждого места контроля прибора величине модуля ускорения силы тяжести.

Этот комплексный параметр используется и для входного контроля прибора, что обеспечивает точность входного контроля при минимизации времени и технических средств проведения входного контроля. Прибор устанавливается в три положения, при которых оси координат XYZ поочередно ориентируются вдоль вертикали места, в каждом положении измеряются проекции модуля вектора ускорения силы тяжести на оси чувствительности шести измерительных осей и через обратную матрицу рассчитывается модуль вектора ускорения силы тяжести.

Допуск на точность измерения модуля вектора ускорения силы тяжести g шестью измерительными каналами задан $\pm 0,05\%$, после летных испытаний изменился на $\pm 0,002\%$ по отношению к формулярному значению.

VI. Выводы

Результаты испытаний измерительного канала прибора БИЛУ, так и всего прибора в целом, выполненного с использованием цифрового усилителя обратной связи (ЦУОС) с ШИМ-преобразователем, построенного на отечественных ЭРИ, показали:

1) обеспечен диапазон измерения ± 10 g;

2) обеспечена выходная информация в виде унитарного кода с формой импульса, точно соответствующей форме импульса выходного сигнала прибора БИЛУ, находящегося в эксплуатации;

3) при проверке параметров модернизированного прибора в нормальных условиях и на крайних температурах рабочего диапазона 0°C и $+40^{\circ}\text{C}$ получены значения параметров, лежащие в пределах допусков для прибора БИЛУ;

4) обеспечена временная стабильность нулевого сигнала, не превышающая 10^{-4} g;

5) обеспечена временная стабильность масштабного коэффициента $\pm 0,02\%$ при нелинейности масштабного коэффициента $\pm 0,01\%$;

6) потребляемая мощность модернизированного прибора БИЛУ уменьшилась на 40% по сравнению с потребляемой мощностью прибора БИЛУ до модернизации (при использовании акселерометров с аналоговой обратной связью и преобразователем «напряжение-частота») за счет исключения усилителей терморегулирования, потреблявших энергию для обеспечения в релейном режиме температуры в оболочках акселерометров не ниже $+30^{\circ}\text{C}$;

7) снижена масса прибора на 500 г за счет уменьшения количества электронных блоков;

8) упрощен процесс регулирования прибора БИЛУ за счет исключения длительного процесса формирования напряжений, компенсирующих температурные погрешности акселерометров, исключен из схемы комплект регулировочных резисторов, которые использовались при упомянутой компенсации;

9) обеспечено импортозамещение ЭКБ, ранее использованной в приборе, получены улучшенные динамические характеристики акселерометра с ЦУОС в сравнении с аналоговым вариантом.

10) введение цифровой обратной связи кварцевых маятниковых акселерометров позволило выполнить модернизацию прибора БИЛУ, который использовался в системе управления спускаемого аппарата с 2004 и обладал термоинвариантностью параметров за счет использования в аналоговой системе обратной связи аппаратурной компенсации температурной зависимости основных параметров, реализованной на импортной элементной базе.

Цифровая обратная связь, реализованная на отечественных ЭРИ, позволила не только обеспечить достигнутый в прежней реализации прибора уровень точностей и термоинвариантности параметров прибора, но и, как показал приведенный в статье анализ, обеспечить серьезные конструктивные запасы прибора, сохранившего после летных испытаний практически без изменений значения параметров при его изготовлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калихман Д.М. [и др.]. Блок измерителей линейных ускорений с прецизионными кварцевыми акселерометрами в качестве чувствительных элементов / Л.Я. Калихман // Материалы IX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – С. 216-220.

2. Калихман Д.М. Кварцевый маятниковый акселерометр линейных ускорений с модулем алгоритмической компенсации температурной зависимости его параметров / Л.Я. Калихман [и др.] // Материалы XII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – С. 236-241.
3. Калихман Д.М. Измеритель вектора кажущегося линейного ускорения – прибор БИЛУ КХ69-042 для СУ спускаемого аппарата корабля «Союз-ТМА» / Л.Я. Калихман [и др.] // Материалы XIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2006. – С. 253-263.
4. Калихман Д.М. Применение микропроцессоров в схемотехнических решениях прецизионных кварцевых маятниковых акселерометров / Л.Я. Калихман [и др.] // Материалы XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 173-176.
5. Калихман Д.М. Результаты разработки кварцевого маятникового акселерометра с алгоритмической компенсацией температурной зависимости основных параметров и цифровым выходом / Л.Я. Калихман [и др.] // Международная научно-техническая конференция «Системы и комплексы автоматического управления летательными аппаратами». – М.: Союз НИО, 2008. – С. 155-169.
6. Пат. 2528119 Российская Федерация. Термоинвариантный измеритель линейного ускорения / Калихман Л.Я. [и др.]; приор. 26.12.12; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПЦАП им. акад. Н.А. Пилюгина»; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.
7. Калихман Д.М. Термоинвариантные измерители угловой скорости и кажущегося ускорения / Л.Я. Калихман [и др.] // Материалы XXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2014. – С. 203-219.
8. Калихман Д.М. Кварцевый маятниковый акселерометр линейных ускорений с модулем алгоритмической компенсации температурной зависимости его параметров / Л.Я. Калихман [и др.] // Материалы XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С. 236-241.
9. Калихман Д.М. Виброустойчивый маятниковый акселерометр линейных ускорений с цифровой обратной связью / В.И. Гребенников [и др.] // Материалы XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С. 368-376.
10. Калихман Д.М. Измеритель вектора кажущегося линейного ускорения – прибор БИЛУ КХ69-042 для СУ спускаемого аппарата корабля «Союз-ТМА» / Л.Я. Калихман [и др.] // Материалы XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 253-263.
11. Калихман Д.М. Результаты экспериментальной отработки термоинвариантного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и перепрограммируемым диапазоном измерения / В.И. Гребенников [и др.] // Материалы XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С. 139-157.
12. Калихман Д.М. Проблемы разработки современных блоков электромеханических измерителей угловой скорости и кварцевых маятниковых акселерометров для объектов ракетно-космической техники. История и перспективы развития / В.В. Скоробогатов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 10 / под научной ред. В.Я. Распопова. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – С. 311-325.
13. Пат. 2528119 Российская Федерация. Термоинвариантный измеритель линейного ускорения / Калихман Л.Я. [и др.]; приор. 10.09.14; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПЦАП им. акад. Н.А. Пилюгина»; опубл. 14.08.2017, Бюл. № 25.
14. Калихман Л.Я. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента измерителей угловых скоростей и линейных ускорений компенсационного типа с цифровой обратной связью и широтно-импульсным управлением током датчика момента / Д.М. Калихман [и др.] // Материалы XXIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – С. 299-306.
15. Пат. 2615221 Российская Федерация. Способ обеспечения виброустойчивости маятникового акселерометра линейных ускорений с цифровой обратной связью и виброустойчивый маятниковый акселерометр / Калихман Д.М. [и др.]; приор. 30.04.2015; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПЦАП им. акад. Н.А. Пилюгина»; опубл. 04.04.2017, Бюл. № 10.
16. Пат. 2626071 Российская Федерация. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента маятникового акселерометра компенсационного типа / Калихман Д.М. [и др.]; приор. 03.06.16; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПЦАП им. акад. Н.А. Пилюгина»; опубл. 21.07.2017, Бюл. № 21.
17. Пат. 2627970 Российской Федерации. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента маятникового широкодиапазонного акселерометра компенсационного типа / Калихман Д.М. [и др.]; приор. 14.11.16; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПЦАП им. акад. Н.А. Пилюгина»; опубл. 14.08.2017, Бюл. № 23.
18. Калихман Д.М. Безобгревные способы обеспечения термоинвариантности смещения нулевого сигнала и масштабного коэффициента кварцевого маятникового акселерометра с аналоговой и цифровой обратной связью / Л.Я. Калихман [и др.] // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – 2018. – № 2 (44). – С. 42-46.
19. Калихман Д.М. Перспективы развития кварцевых маятниковых акселерометров в БИНС авиационного и космического применения / В.В. Скоробогатов // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. – 2018. – № 20. – С. 21-50.
20. Калихман Д.М. Способ повышения стабильности масштабного коэффициента маятникового акселерометра с цифровой обратной связью / Л.Я. Калихман [и др.] // Материалы XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2018. – С. 331-333.
21. Калихман Д.М. Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи / Е.А. Депутатова, Д.С. Гнусарев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики, оптики. – СПб., 2018. – Т. 18, № 6. – С. 1091-1098.
22. Скоробогатов В.В. Основы разработки безобгревных термоинвариантных измерителей угловой скорости и кажущихся ускорений для систем управления ракетно-космическими объектами: дис. ... канд. техн. наук: СГТУ им. Гагарина Ю.А. Саратов, 2018.
23. Калихман Д.М. Шестиосный блок измерителей кажущихся ускорений на основе прецизионного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью для систем управления космическими кораблями «Союз - МС» и «Прогресс - МС» / Л.Я. Калихман [и др.] // Материалы XXVI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2019. – С. 225-231.
24. Гребенников В.И. Маятниковый акселерометр с цифровым управлением и новыми функциональными возможностями / Е.А. Депутатова [и др.] // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2021. – № 2. – С. 73-95.
25. Калихман Л.Я. Результаты лётных испытаний шестиосного блока измерителей кажущегося ускорения на основе прецизионного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью в составе космического корабля «Союз МС-14» / Д.М. Калихман [и др.] // Материалы XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2020. – С. 184-187.

Оцифровка и коррекция квантовых ошибок

Гушанский Сергей Михайлович
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
smgushanskiy@sfedu.ru

Козловская Мария Алексеевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
arhipenko@sfedu.ru

Познина Наталья Анатольевна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
poznina@sfedu.ru

Аннотация. Одна из основных проблем, которую необходимо преодолеть в ближайшем будущем для практического создания квантовых компьютеров, сделать квантовое вычисление устойчивым к взаимодействию с внешней средой и устранив неточность выполнения операций. Протоколы квантовой коррекции ошибок будут играть главную роль в реализации квантовых вычислений. Выбор кода исправления ошибок повлияет на весь стек квантовых вычислений, начиная с компоновки кубитов на физическом уровне и заканчивая стратегиями компиляции на программном уровне. В данной работе уделяется внимание исследованию оцифровке квантовых ошибок, краткому обзору квантовых типов ошибок и проблем квантовой коррекции ошибок.

Abstract. One of the main problems that must be overcome in the near future for the practical creation of quantum computers - to make quantum computation resistant to interaction with the external environment and to eliminate the inaccuracy of operations. Quantum error correction protocols will play a major role in the implementation of quantum computing. The choice of error correction code will affect the entire quantum computing stack, from the layout of qubits at the physical level to compilation strategies at the software level. In this work, attention is paid to the study of the digitization of quantum errors, a brief review of quantum types of errors and problems of quantum error correction.

Ключевые слова: Оцифровка, когеренция, квантовые ошибки, амплитуда, сфера, фаза.

Keywords: Digitization, coherence, quantum errors, amplitude, sphere, phase.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для квантовых компьютеров, где кубиты реализуются как хрупкие квантовые системы, ярко выраженной формы защиты от ошибок не существует. Таким образом, любой квантовый компьютер с моделью схемы, основанный на текущих и будущих технологиях кубитов, потребует какой-то активной коррекции ошибок. Несмотря на это прорыв был достигнут в 1995 году Петром Шором с работой, в которой была предложена первая схема квантовой коррекции ошибок [9]. Метод Шора продемонстрировал, как квантовая информация может быть избыточно закодирована путем ее запутывания в расширенной системе кубитов. Последующие результа-

ты затем продемонстрировали, что расширения этого метода в принципе могут быть использованы для произвольного подавления частоты квантовых ошибок при условии соблюдения определенных физических условий на самих кубитах [10]. Именно с этими разработками в области квантовой коррекции ошибок область квантовых вычислений перешла от теоретического любопытства к практической возможности. Было написано много обзоров, посвященных квантовой коррекции ошибок и связанным с ней подпольям [2–6]. В статье описываются основные концепции, лежащие в основе кодов квантовой коррекции ошибок.

Вместо битов в классических системах фундаментальной единицей квантовой информации является кубит. Общее состояние кубита можно записать следующим образом $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, где α и β – комплексные числа, удовлетворяющие условию $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Кубиты могут кодировать информацию в суперпозиции своих базовых состояний, что означает, что квантовые компьютеры имеют доступ к вычислительному пространству, которое масштабируется как 2^n , где n – общее количество кубитов [11]. Именно за счет использования суперпозиции в сочетании с другими квантовыми эффектами, такими как запутанность, можно построить алгоритмы, обеспечивающие квантовое преимущество [1, 2]. Однако, если такие алгоритмы когда-либо будут реализованы на текущем или будущем квантовом оборудовании, потребуется исправить ошибки в кубитах.

II. ОЦИФРОВКА КВАНТОВЫХ ОШИБОК

В классической информации биты находятся в состоянии «0» или «1». Следовательно, единственный тип ошибки, который должен рассматриваться переворот битов, который принимает $0 \rightarrow 1$ и наоборот.

Общее состояние кубита определяется в уравнении 1 и может принимать континuum значений между его базисными состояниями [3].

С точки зрения разработки кодов исправления ошибок, это свойство проблематично, так как это означает, что кубит подвержен бесконечному количеству ошибок. Чтобы проиллюстрировать это более наглядно, полезно переписать общее состояние кубита в терминах геометрического представления, заданного где амплитуды вероятностей сохраняют условие

$$\langle\psi| = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle. \quad (1)$$

В этой форме состояние кубит соответствует точке, заданной углами θ и ϕ , на поверхности, так называемой сфере Блоха [2]. Пример состояния в этом представлении показан на рис. 1.

$$\langle \psi | = \cos \frac{\theta}{2} | 0 \rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} | 1 \rangle. \quad (2)$$

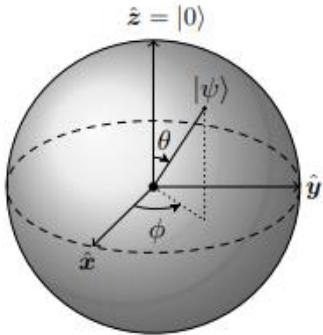


Рис. 1. В геометрическом представлении состояние кубита можно представить в виде точки на поверхность сферы Блоха

Ошибки кубита могут возникать из-за множества физических процессов. Самый простой случай для изучения - это ошибки, которые заставляют кубит когерентно перемещаться из одной точки на сфере Блоха в другую. Не редко, такие ошибки могут возникать из-за систематических сбоев управления в оборудовании [4].

Математически когерентные ошибки описываются унитарной операцией $U(\delta\theta, \delta\phi)$, которая развивает состояние кубита следующим образом

$$U(\delta\theta, \delta\phi) |\psi\rangle = \cos \frac{\theta + \delta\theta}{2} |0\rangle + e^{i(\phi + \delta\phi)} \sin \frac{\theta + \delta\theta}{2} |1\rangle, \quad (3)$$

где $\theta + \delta\theta$ и $\phi + \delta\phi$ – новые координаты на сфере Блоха. Отсюда мы видим, что кубиты подвержены континууму когерентных ошибок, полученных путем изменения параметров $\delta\theta$ и $\delta\phi$.

Поэтому на первый взгляд может показаться, что протоколы квантовой коррекции ошибок должны быть основаны на методах классических аналоговых вычислений, для которых теория исправления ошибок не очень хорошо развита. К счастью, квантовые ошибки можно оцифровать, так что возможность исправления конечно-го набора ошибок достаточна для исправления любой ошибки [5]. Стоит отметить, что когерентные шумовые процессы описываются матрицами, которые могут быть расширенными членами базиса Паули. Например, базис Паули для двумерных матриц имеет вид:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Процесс когерентной ошибки с одним кубитом, описанный в уравнении 3, может быть расширен на вышеуказанной основе и выглядит следующим образом:

$$U(\delta\theta, \delta\phi) |\psi\rangle = \alpha_I |0\rangle + \alpha_X X |0\rangle + \alpha_Z Z |0\rangle + \alpha_Y Y |0\rangle, \quad (5)$$

где I, X, Y, Z – коэффициенты разложения. Отметив, что Y – матрица Паули эквивалентна (с точностью до фазы) произведению XZ , это выражение можно дополнитель но упростить до

$$U(\delta\theta, \delta\phi) |\psi\rangle = \alpha_I |0\rangle + \alpha_X X |0\rangle + \alpha_Z Z |0\rangle + \alpha_{XZ} XZ |0\rangle.$$

Приведенное выше выражение показывает, что любой когерентный процесс ошибок может быть разложен на сумму из множества Паули $\{I, X, Z, XZ\}$. В следующих разделах мы увидим, что сам процесс исправления ошибок включает в себя выполнение проективных измерений, которые приводят к коллапсу вышеупомянутой суперпозиции до подмножества ее членов. В результате код квантовой коррекции ошибок с возможностью исправления ошибок, описываемых матрицами X - и Z -Паули, сможет исправить любую когерентную ошибку [1].

Этот эффект, называемый оцифровкой ошибки, имеет решающее значение для успеха устранения квантовой ошибки.

III. КВАНТОВЫЕ ТИПЫ ОШИБОК

В результате оцифровки ошибки возникают два основных типа квантовых ошибок, которые необходимо учитывать квантовыми кодами. Ошибки Паули X -типа можно рассматривать как квантовые перевороты битов. Действие X -ошибки на общее состояние кубита является

$$X|\psi\rangle = \alpha X |0\rangle + \beta X |1\rangle = \alpha |1\rangle + \beta |0\rangle. \quad (6)$$

Второй тип квантовой ошибки, Z -ошибка, часто называют переворотом фазы и не имеет классического аналога. Фазовые перевороты отображают базисные состояния кубита, и, следовательно, имеют следующее действие на общее состояние кубита:

$$Z|\psi\rangle = \alpha Z |0\rangle + \beta Z |1\rangle = \alpha |0\rangle - \beta |1\rangle. \quad (6)$$

В данном случае, мы ограничиваемся обсуждением когерентных ошибок, действующих на отдельные кубиты. Так, оцифровка результата ошибки обобщается на произвольные квантовые процессы, в том числе, которые описывают некогерентную эволюцию квантового состояния в результате взаимодействия кубитов с их окружением [6].

IV. ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК

Оцифровка квантовых ошибок означает, что можно повторно использовать определенные методы из классических теорий кодирования в квантовой коррекции ошибок. Однако остается ряд осложнений, которые не дают осуществить прямой перевод классических кодов в квантовые.

Первое осложнение это теорема о запрете клонирования для квантовых состояний [7], которая утверждает, что невозможно построить унитарный оператор U_{clone} , который выполняет следующую операцию,

$$U_{clone} (|\psi\rangle \otimes |0\rangle) \rightarrow |\psi\rangle \otimes |\psi\rangle, \quad (6)$$

где $|\psi\rangle$ – состояние, подлежащее клонированию. Классические коды, напротив, работают в предположении, что данные могут быть произвольно дублированы. Поэтому для квантового кодирования необходимо найти альтернативные способы добавления избыточности в систему.

Второе осложнение в квантовом кодировании возникает из-за того, что кубиты подвержены как битовым переворотам (X -ошибки), так и фазовым переворотам (Z -ошибки). Поэтому коды квантовой коррекции ошибок

должны быть разработаны с возможностью одновременного обнаружения обоих типов ошибок. В отличие от этого, в классическом кодировании необходимо учитывать только ошибки переворота битов.

Последним осложнением, характерным для квантовой коррекции ошибок, является проблема коллапса волновой функции. В классической системе можно измерять произвольные свойства разрядного регистра без риска компрометации закодированной информации. Однако для квантовых кодов любые измерения кубитов, выполняемые в рамках процедуры исправления ошибок, должны быть тщательно подобраны, чтобы не привести к коллапсу волновой функции и стиранию закодированной информации.

V. КВАНТОВАЯ ИЗБЫТОЧНОСТЬ И ИЗМЕРЕНИЕ СТАБИЛИЗАТОРА

Как отмечалось в предыдущем разделе, квантовая коррекция ошибок усложняется теоремой о запрете клонирования, коллапсом волновой функции и существованием уникального квантового типа ошибки – переворота фазы.

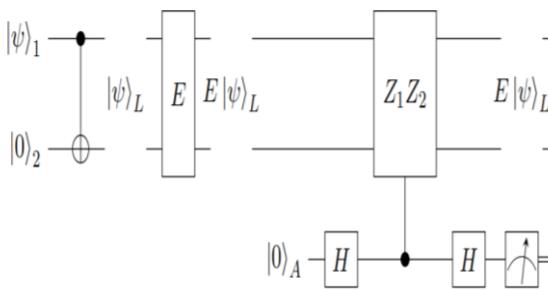


Рис. 2. Принципиальная схема двухкубитного кода.

Этап кодирования: информация, содержащаяся в $|\psi\rangle_1$ запутана с кубитом избыточности $|0\rangle_2$ для создания логического состояния $|\psi\rangle_L$. **Стадия ошибки:** во время окна ошибки (показано схемным элементом E), два кодовых кубита потенциально подвержены ошибкам переворота битов.

Этап извлечения синдрома: оператор Z_1Z_2 , управляемый вспомогательный кубит A применяется к кодовым кубитам. Последующее измерение анциллы дает кодовый синдром S

Итак, столкнувшись с этими проблемами, ничего не остается как добавить избыточность в квантовую систему, чтобы позволить ошибкам быть обнаруженным в реальном времени. Классические коды с повторением работают за счет увеличения ресурсов, используемых для кодирования данных, сверх теоретического минимума. Аналогично, в квантовых кодах избыточность добавляется путем расширения Гильбертова пространства, в котором кодируются кубиты [8]. Чтобы увидеть, как это достигается на практике, мы теперь опишем двухкубитовый код, прототип квантового кода, предназначенный для обнаружения однобитовой ошибки переворота. Обратите внимание, что это не соответствует клонированию состояния.

Эффект операции кодирования заключается в распределении квантовой информации в начальном состоянии $|\psi\rangle$ по запутанному двухстороннему логическому состоянию $|\psi\rangle_L$. Это вводит избыточность в кодировку,

которые можно использовать для обнаружения ошибок. Чтобы понять, как именно это работает, поучительно рассмотреть вычислительные гильбертовы пространства до и после кодирования.

$$|\psi\rangle_L \in H_4 = \text{span}\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}.$$

Более конкретно, логический кубит определяется в двумерном подпространстве этого расширенного Гильбертова пространство

$$|\psi\rangle_L \in C = \text{span}\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\},$$

где C называется кодовым пространством. Теперь представьте, что логический кубит подвергается ошибке переворота битов на 1 кубит, приводящий к состоянию

$$X_1|\psi\rangle_L = \alpha|10\rangle + \beta|01\rangle,$$

где X_1 – ошибка переворота бита, действующая на первый кубит. Результатирующее состояние превращается в новое подпространство.

$$X_1|\psi\rangle_L \in F \subset H_4,$$

где мы называем F подпространством ошибок. Обратите внимание, что ошибка X_2 также изменит логическое состояние на подпространство F . Если логическое состояние не повреждено, оно занимает кодовое пространство C , тогда как если оно подвергается однокубитовой перевороте битов, оно занимает пространство ошибок F . Поскольку подпространства C и F взаимно ортогональны, можно различить, какое подпространство занимает логический кубит, с помощью проективное измерение без ущерба для закодированной квантовой информации. В квантовом кодировании измерения такого типа называются измерениями стабилизатора.

Для того чтобы различать кодовое пространство C и пространство ошибок F , проективный выполняется измерение формы Z_1Z_2 . Оператор Z_1Z_2 дает (+1) собственное значение, когда применяется к логическому состоянию [8–10].

VI. Вывод

Квантовый компьютер обладает значимым преимуществом перед классическим, которое заключается в ускорении вычислений, специально подготовленных для квантового компьютера. Однако одной из главных проблем является наличие разного рода ошибок, которые не имеют стандартного решения.

Нахождение различных видов квантовых ошибок, а также разработка и исследование кодов для их исправления является одной из актуальных задач 21 века. В данной работе была рассмотрена оцифровка квантовых ошибок, проведен краткий обзор квантовых типов ошибок и проблем связанных с квантовой коррекцией ошибок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Цян Х, Чжоу Х, Ван Джей и др. Крупномасштабная кремниевая квантовая фотоника, реализующая произвольную двухкубитную обработку // Фотоника природы. – 2018. – 12 (9). – С. 534–539.
- Гушанский С.М., Горбунов А.В., Потапов В.С. Разработка схемы коррекции и исправления квантовых типов ошибок // Сборник трудов X международной конференции “Технологии разработки информационных систем 2020”, г. Геленджик, Краснодарский край. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 58–63.

3. Рэндалл Дж., Вейдт С., Стэндинг ЭД и др. Эффективная подготовка и обнаружение кубитов и кутритов в микроволновом состоянии с захваченными ионами // Физический обзор А. – 2015. – 91 (1).
4. Гуцанский С.М., Потапов В.С. Разработка корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко Компьютерные информационные технологии науке, управлении «КомTex-2020». – Т. 1. – С. 73-82.
5. Брандл М.Ф., ван Мурик М.В., Постлер Л. и др. Криогенная установка для квантовых вычислений захваченных ионов // Обзор научных инструментов. – 2016. – 87(11). – 113103.
6. Qiang X, Zhou X, Wang J, et al. Large-scale silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing. *Nature Photonics*. 2018;12(9):534–539. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0236-y>.
7. Randall J, Weidt S, Standing ED, et al. Efficient preparation and detection of microwave dressed-state qubits and qutrits with trapped ions // *Physical Review A*. – 2015. – 91.
8. Ballance C, Harty T, Linke N, et al. High-fidelity quantum logic gates using trapped-ion hyperfine qubits// *Physical Review Letters*. – 2016. – 117.
9. Brandl M.F., van Mourik M.W., Postler L, et al. Cryogenic setup for trapped ion quantum computing // *Review of Scientific Instruments*. – 2016. – 87 (11). – 113103.
10. Дебнат С, Линке Н.М., Фиггарт С и др. Демонстрация небольшого программируемого квантового компьютера с атомными кубитами // Природа. – 2016. – 536 (7614). – 63.
11. Гуцанский С.М., Козловский А.В., Буглов В.Е. Декогеренция и квантовая коррекция ошибок // Приоритетные направления развития российской науки: материалы III всероссийской научно-практической конференции (19 мая 2020г., Санкт-Петербург). – Изд-во ЦПМ «Академия Бизнеса», Саратов 2020. – С. 16-20.

Модель кремниевого пьезорезистивного датчика давления

Дробынин Михаил Евгеньевич
Институт прикладных
информационных технологий
и коммуникаций
Саратовский государственный
технический университет
им. Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
misha_q@mail.ru

Львов Алексей Арленович
Институт прикладных
информационных технологий
и коммуникаций
Саратовский государственный
технический университет
им. Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
alvova@mail.ru

Никифоров Александр Анатольевич
Институт электронной техники
и приборостроения
Саратовский государственный
технический университет
им. Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
ieei_director@mail.ru

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
Отдел схемотехники
и программирования
Энгельсское ОКБ «Сигнал»
им. А.И. Глухарева
Энгельс, Россия
peter.lvov@gmail.com

Филина Екатерина Александровна
Институт прикладных
информационных технологий
и коммуникаций
Саратовский государственный
технический университет
им. Гагарина Ю.А.
Саратов, Россия
ekaterinafilinav@gmail.com

Аннотация. Описаны интерфейсы формирования сигналов кремниевых пьезорезистивных датчиков давления на основе вариантов аппаратной и программной компенсации. Рассмотрена подробная модель запаса точности для обоих интерфейсов. Показано, что из-за различия величины температурного коэффициента смещения датчиков для получения точности около 1% от максимума полной шкалы принципиально необходима калибровка этого коэффициента. Также показано, что при программной компенсации определяющим параметром является разрешение АЦП, а при аппаратной компенсации – разрешения циклов обратной связи для коррекции смещения и усиления. Получено, что при оптимизированном интерфейсе точность зависит от нелинейности датчика и его температурной погрешности.

Abstract. Interfaces for signal generation of silicon piezoresistive pressure sensors based on hardware and software compensation are described. A detailed model of the accuracy margin for both interfaces is considered. It is shown that due to the difference in the value of the temperature coefficient of the sensors displacement, calibration of this coefficient is fundamentally necessary to obtain an accuracy of about 1% of the maximum of the full scale. It is also shown that for software compensation, the determining parameter is the resolution of the ADC, and for hardware compensation – the resolution of feedback cycles for correcting bias and gain. It is found that with an optimized interface, the accuracy depends on the non-linearity of the sensor and its temperature error.

Ключевые слова: датчик давления, смещение сигнала датчика, программная и аппаратная компенсация, точность измерения, погрешности.

Keywords: pressure sensor, sensor offset, software and hardware compensation, measurement accuracy, errors.

I. ВВЕДЕНИЕ

В статье описываются два основных интерфейса обвязки для пьезорезистивных датчиков давления: первый полностью основан на компенсации посредством программного обеспечения; во втором компенсация достигается с помощью аппаратного обеспечения. Математическая модель выхода дается для обоих подходов. Детально описывается глобальный запас точности: он позволяет идентифицировать источники ошибок (калибровка, погрешность измерения температуры, нелинейность и т.д.) и информировать проектировщика о ключевых параметрах, которые необходимо оптимизировать для достижения требуемой точности. Проводится сравнение двух подходов: для данной целевой точности определяются требуемые характеристики ключевых компонентов (усилителя, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и т.д.). Также представляются некоторые экспериментальные результаты.

II. ИНТЕРФЕЙСЫ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ

A. Общие характеристики нескомпенсированных кремниевых пьезорезистивных датчиков

Выходной сигнал нескомпенсированных кремниевых пьезорезистивных датчиков может варьироваться в больших пределах. Это связано с большим разбросом параметров однотипных датчиков, различными чувствительностью и температурными коэффициентами от устройства к устройству. В некоторых случаях максимальное значение $\alpha = V_{MAXout}/V_{MINout}$ – отношения максимального значения выходного сигнала к его минимальному значению (с учетом максимальных температурных дрейфов и разброса параметров от устройства к устрой-

ству) может быть как минимум равно двум и даже выше, если диапазон температур достаточно велик [1]. Помимо этого смещение сигнала датчика может представлять собой большую часть выходного сигнала датчика, особенно, когда измеряются малые давления. Эти две особенности подразумевают, что:

- обычно требуется калибровка для достижения хорошей точности;
- диапазон сигналов может представлять собой только небольшую часть доступного для кодирования динамического диапазона АЦП.

На основе этих характеристик разработчик интерфейса формирователя сигнала может выбирать любой из трех возможных подходов [2, 3]:

- программная компенсация: интерфейс состоит из одного усилителя и АЦП; калибровка и температурная компенсация полностью выполняются с помощью программного обеспечения;
- аппаратная компенсация: интерфейс вычитает смещение сигнала датчика и усиливает только полезный сигнал, а коэффициент усиления контролируется микроконтроллером так, что выход интерфейса соответствует динамическому диапазону АЦП, независимо от изменений параметров датчика и возможного температурного дрейфа;
- комбинированный подход: интерфейс позволяет грубую аппаратную компенсацию, а программное обеспечение выполняет более тонкую настройку.

Последний подход не рассматривается подробно, поскольку он занимает промежуточное положение между подходами с использованием программного обеспечения и аппаратной компенсации.

B. Программная компенсация

Ее блок-схема показана на рис. 1 [2]. Чтобы иметь четкое представление о разных источниках ошибок, сначала рассмотрим передаточные функции датчика и схемы формирователя сигнала. Выход датчика усиливается дифференциальным усилителем, а затем компенсируется программным обеспечением. Для этой цели данные калибровки хранятся в микропроцессоре EPROM, а температура датчика измеряется специальным датчиком температуры.

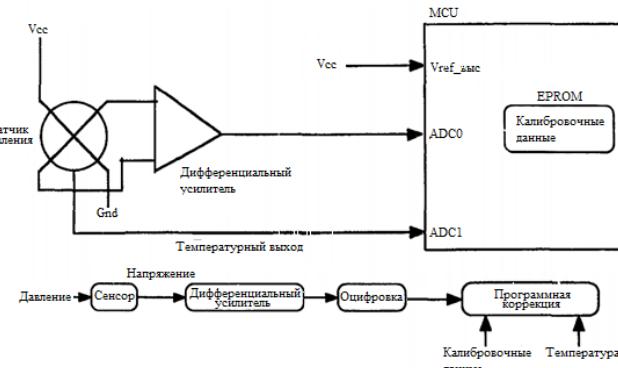


Рис. 1. Структурная схема программной компенсации:

MCU – микропроцессор; ADC – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); V_{cc} – напряжение питания; G_{nd} – общий провод (заземление)

На основании результатов работ [4–6] выходной сигнал датчика можно представить в виде:

$$\Delta V = V_{offens}(T, V_{cc}) + S(T, V_{cc})P, \quad (1)$$

где P – давление, T – температура, V_{offens} – смещение сигнала датчика, S – чувствительность датчика и V_{cc} – напряжение питания.

Выходной сигнал дифференциального усилителя находится из соотношения:

$$V_{out} = GV_{in} + V_{offG}(V_{cc}), \quad (2)$$

где G – коэффициент усиления (следует учитывать, что G может быть разным у двух различных формирователей из-за допусков у резисторов), V_{offG} является смещением собственно усилителя, а V_{in} – входное напряжение усилителя. Параметры G и V_{offG} считаются не зависящими от температуры.

Кроме того, выход датчика делают зависимым прямо пропорционально от величины V_{cc} [4, 7]. Таким образом, дрейф V_{cc} влияет на масштабный коэффициент и смещение. Для преодоления этой проблемы рекомендуется связать высоковольтный выход АЦП с V_{cc} , чтобы использовать регулируемый источник напряжения и выполнить калибровку с помощью этого регулируемого источника. В дальнейшем предполагается, что регулятор напряжения реализован так, что его рабочие характеристики не зависят от V_{cc} . Поэтому в математических выражениях он будет опущен. Вход АЦП рассчитывается из соотношения:

$$V_p = S_p(T)P + V_{off}(T), \quad (3)$$

где: $V_{off}(T) = V_{off}(T_0) + T_{CO}T_{25}$; $T_0 = 25^\circ\text{C}$; $T_{25} = T - T_0$; $V_{off}(T_0) = G V_{offens}(T_0) + V_{offG}$; $T_{CO} = GT_{Cosen}$. Тогда: $S_p(T) = GS(T) = GS(T_0)[1 + T_{CS}(T_{25})]$ – температурный коэффициент смещения датчика и T_{CS} – температурный коэффициент чувствительности датчика, который принимает отрицательные значения для кремниевых пьезорезистивных датчиков давления. Предполагаемая температура $T_0 = 25^\circ\text{C}$. Конечный пользователь фактически заинтересован только в знании $S_p(T_0)$ и $V_{off}(T_0)$ и их соответствующих температурных коэффициентов T_{CS} и T_{CO} . Поэтому перед установкой датчика необходима его калибровка (чувствительного элемента (ЧЭ) и схемы формирователя сигнала): для этого датчик должен быть испытан при двух значениях давления и двух температурах.

C. Аппаратная компенсация

Ее блок-схема приведена на рис. 2 [2, 8, 9]. Сигнал датчика усиливается; он затем компенсируется с помощью схемы цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) или широтно-импульсной модуляции (ШИМ) через фильтр низких частот. Изменение чувствительности компенсируется благодаря использованию усилителя с регулируемым коэффициентом усиления. Сначала находятся передаточные функции двух составляющих ее цепей, на основании которых вычисляется общая передаточная функция для сигнала.

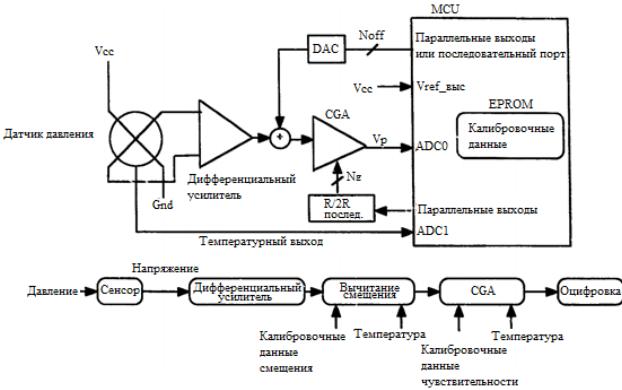


Рис. 2. Структурная схема аппаратной компенсации:
DAC – цифро-аналоговый преобразователь; CGA – усилитель с регулируемым коэффициентом усиления; R/2R послед. – матрица резисторов; V_{cc} – напряжение питания; G_{nd} – общий провод (заземление); N_g – число битов управления усиливанием и N_{off} – число битов управления смещением

Выход дифференциального усилителя и компенсация сигнала смещения. Эта цепь должна усиливать выход датчика и компенсировать его смещение, чтобы вторая цепь усиливала только полезный сигнал.

$$V_{out} = G_{diff} V_{in} + V_{off,diff} - V_{off}(T), \quad (4)$$

где G_{diff} и $V_{off,diff}$ – коэффициент усиления и смещение дифференциального усилителя, соответственно. Они снова считаются не зависящими от температуры. $V_{off}(T)$ контролируется микроконтроллером так, что он компенсирует смещение датчика и регулирует выходное смещение при фиксированном напряжении V_0 . $V_{off}(T)$ вычисляется по следующей формуле:

$$V_{off}(T) = G_{diff} V_{offsens}(T) + V_{off,diff} - V_0/G_{CGA}, \quad (5)$$

где G_{CGA} коэффициент усиления усилителя с регулируемым коэффициентом усиления. Общий коэффициент усиления этого звена выбран таким, что максимальный полезный сигнал соответствует динамическому диапазону АЦП.

Усилитель с регулируемым коэффициентом усиления. Это устройство должно компенсировать изменения чувствительности и температурные дрейфы. Оно контролируется микроконтроллером, чтобы произведение чувствительности датчика S_{sen} и двух коэффициентов усиления ($S_{sen} \times G_{CGA} \times G_{diff}$) было постоянным, независимо от температурных дрейфов и вариаций чувствительности. Таким образом, G_{CGA} может изменяться в пределах между 1 и α . Следовательно, в идеальном случае V_p находится из формулы:

$$V_p = V_0 + S_p P, \quad (6)$$

где S_p не зависит от чувствительности датчика и температуры среды.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

A. Программная компенсация

Выходной сигнал V_p перед оцифровкой может быть найден как:

$$V_p = S_p(T)P + V_{off}(T) + N_L(P), \quad (7)$$

где $N_L(P)$ – нелинейная часть выходного сигнала. Таким образом, относительная ошибка в процентах от верхнего предела измерения (ВПИ) может быть записана как:

$$\varepsilon_p = (V_p - V'_p)/S_p(T)\Delta P, \quad (8)$$

где V'_p – значение, рассчитанное микроконтроллером, ΔP – рабочий диапазон давления. Следует различать четыре типа ошибок: смещения, чувствительности, нелинейности и квантования.

Погрешность смещения находится из выражения:

$$\varepsilon_{offset} = K/S_p(T)\Delta P, \quad (9)$$

где $K = V_{off}(T_0) - V'_p(T_0) + (T - T')\Gamma_{CO} + (T_{CO} - T'_{CO})\Gamma_{25}$.

Первая часть представляет ошибку калибровки смещения, вторая – ошибку из-за температурной погрешности $\varepsilon_T = T - T'$, а третья – ошибку калибровки Γ_{CO} . Будем считать, что погрешность температуры, ошибка смещения при 25 °C и смещение при второй температуре калибровки не коррелированы. Но мы не можем считать, что ошибка Γ_{CO} и ошибка смещения не коррелированы, поскольку Γ_{CO} также зависит от смещения при двух калибровочных температурах. Кроме того, будем предполагать, что ошибки смещения при этих двух температурах одинаковы и определяются разрешением калибровочного инструмента ε_{CAL} . Поэтому полная ошибка смещения представляет собой квадратичную сумму этих источников ошибок:

$$\varepsilon_{offset} = \frac{1}{S_p(T)\Delta P} \sqrt{\varepsilon_{CAL}^2 \left[\left(\frac{1 + \Gamma_{25}}{\Delta T} \right)^2 + \frac{\Gamma_{25}^2}{\Delta T^2} \right] + \Gamma_{CO}^2 \varepsilon_T^2}. \quad (10)$$

Таким образом, существуют различные способы минимизации ошибки смещения:

- Калибровка Γ_{CO} с большим температурным диапазоном, чем рабочий диапазон, что делает $\Gamma_{25}/\Delta T$ незначительным. Но этого не всегда легко достичь, когда диапазон рабочих температур достаточно велик. Поэтому не следует игнорировать эту возможность;
- Высокое разрешение средств калибровки: имеет смысл устранить погрешности калибровки с помощью калибровочного оборудования с высоким разрешением.
- Определение смещения, оптимизирующего ε_{offset} на всем диапазоне температур:

$$\varepsilon_{offset} = \frac{1}{S_p(T)\Delta P} \sqrt{5\varepsilon_{CAL}^2 + \Gamma_{CO}^2 \varepsilon_T^2}. \quad (11)$$

Ошибка чувствительности. Для кремниевого пьезорезистивного датчика чувствительность изменяется линейно с температурой; его температурный коэффициент T_{CS} обычно является хорошо контролируемым параметром: $T_{CS} = 0,19 \pm 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [1, 5–8]. Поскольку усиление усилителя не должно меняться с температурой, калибровка Γ_{CS} не требуется в большинстве приложений. Однако, если диапазон рабочих температур очень большой

(100 °C) и целевая точность высокая (1% от ВПИ), может потребоваться более тонкое знание T_{CS} . Но разработчик должен знать, что T_{CS} и чувствительность частично коррелированы. Ошибка чувствительности приводит к ошибке ε_s , которая определяется как:

$$\varepsilon_s = M / S_p \Delta P, \quad (12)$$

где $M = (S_p(T) - S_p(T_0))(1 + T_{CS}T_{25}) - S_p(T_0)T_{CS}(T - T')$.

Первое слагаемое обусловлено ошибкой калибровки чувствительности, а второе – погрешностью измерения температуры. Как и выше, предполагается, что погрешность температуры и ошибка калибровки чувствительности не коррелированы, и ошибки калибровки смещения и полномасштабной калибровки не коррелированы и определяются разрешением калибровочного оборудования. При выполнении калибровки чувствительности $\sqrt{2\varepsilon_{CAL}/\Delta P}$ максимальное значение ε_s определяется следующим образом:

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{CAL}^2}{\Delta P^2 S_p^2(T_0)} + \frac{\varepsilon_T^2 T_{CS}^2 S_p^2(T_0)}{S_p^2(T)}}. \quad (13)$$

Погрешность нелинейности. Нелинейность в основном обусловлена датчиком и АЦП. Нелинейность усилия можно опустить, поскольку система спроектирована так, что выходы достаточно далеки от низких и высоких выходных напряжений операционных усилителей. Назовем q шагом квантования. Нелинейность АЦП обычно составляет около $q/2$ и:

$$\varepsilon_{NL} = \sqrt{\varepsilon_{NLsens}^2 + \frac{q^2}{4S_p^2(T)\Delta P^2}}, \quad (14)$$

где ε_{NLsens} – нелинейность датчика в процентах от ВПИ.

Погрешность квантования находится из соотношения:

$$\varepsilon_q = q / [S_p(T)\Delta P]. \quad (15)$$

Следующая формула дает общую погрешность для наихудшего случая, которая характеризует запас по ошибке:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\varepsilon_T^2 \left(\frac{T_{CS}^2}{(1+T_{CS}\Delta T)^2} + \frac{T_{CO}^2}{(S_{p\min}\Delta P)^2} \right) + \varepsilon_{NLsens}^2 + \frac{0,5q^2}{(S_{p\min}\Delta P)^2}}. \quad (16)$$

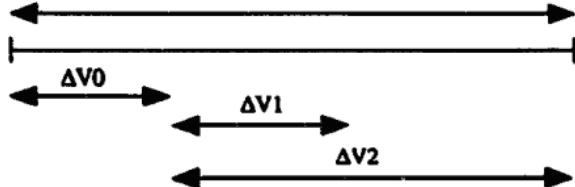
Пример. Рассмотрим приложение рассмотренной методики на практике. Предположим, что диапазон измеряемого давления составляет 1 бар, а температурный диапазон – от 0 до 85 °C (что типично в промышленности). Единственным ключевым параметром для проектирования формирователя сигнала является параметр α .

Рис. 3 показывает, что необходимо учитывать некоторый запас, чтобы выходной сигнал мог кодироваться для любого возможного приложения (независимо от измеряемых значений давления и температуры). Для этой цели некоторая часть динамического диапазона кодирования отводится для сигнала смещения. В худшем случае (низкая чувствительность и высокая температура) минимальный выходной диапазон состав-

ляет всего около одной трети входного диапазона АЦП. При использовании стандартного датчика давления ДД-М (ОКБ «Сигнал», Энгельс, Саратовская обл.) получены следующие данные: $\frac{T_{CS}}{1+T_{CS}\Delta T} = 0,21\% \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;

$$\frac{T_{CO}}{S_{p\min}\Delta P} = 0,08\% \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \frac{V_{MAXoffset}}{S_{p\min}\Delta P} = 0,8; \alpha = 2,4.$$

5 В: Входной диапазон напряжения АЦП



(2,25% от ВПИ). В этом случае погрешности измерения температуры и ошибки дискретизации АЦП перестают играть значительную роль, и точность определяется, главным образом, нелинейностью датчика.

B. Аппаратная компенсация

Выходной сигнал, соответствующий динамическому диапазону АЦП $S_p \Delta P$, после оцифровки равен 2^N [9, 11], где N – число разрядов (битов) АЦП.

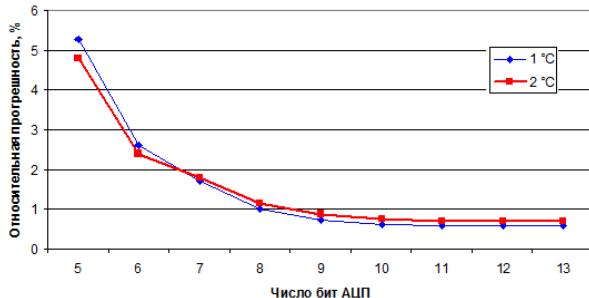


Рис. 4. Точность программной компенсации. Зависимость относительной погрешности от разрешения АЦП, для значений погрешности измерения температуры 1 и 2 °C. При разрешении АЦП выше 10 бит влияние его на точность становится незначительным

Ошибка смещения. Погрешность сигнала смещения может быть вызвана тремя типами ошибок:

- неустранимая погрешность компенсации ошибок калибровки, измерения температуры и т.д., задаваемая уравнением (11);
- нелинейность компенсации сигнала смещения ЦАП, которая обычно составляет около $0,5q'$ (q' — шаг квантования ЦАП). Поэтому ε_{offset} можно записать в виде:

$$\varepsilon_{offset} = \frac{1}{S_p(T)\Delta P} \sqrt{5\varepsilon_{CAL}^2 + T_{CO}^2\varepsilon_T^2 + \frac{\alpha^2 q'^2}{2}}. \quad (17)$$

Таким образом, абсолютная ошибка смещения сигнала выше, чем в предыдущем разделе, но обычно ниже относительного значения, так как выходной диапазон сигнала соответствует общему динамическому диапазону АЦП.

Ошибка чувствительности также возникает из-за трех типов ошибок:

- ошибка компенсации внутренней погрешности из-за ошибок калибровки, считывания температуры и т.д., как указано в уравнении (13);
- нелинейность $R/2R$ -матрицы резисторов, которая задает коэффициент усиления;
- дискретность квантования коэффициента усиления g .

Коэффициент усиления контролируется микроконтроллером через $R/2R$ -матрицу резисторов в соответствии с выражением:

$$G_{CGA}(i) = 1 + ig, \quad (18)$$

где $g = (\alpha - 1)/2^{N_g}$ – дискретность квантования коэффициента усиления, i – целое число и N_g – число битов для управления усиливанием.

Ошибка относительного квантования усиления. Также предполагается, что относительная нелинейность коэффициента усиления равна относительной дискретности его квантования. Поэтому ε_s можно вычислить следующим образом:

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{CAL}^2}{\Delta P^2 S_p^2(25^\circ C)} + \frac{\varepsilon_T^2 T_{CS}^2}{(1 + T_{CS}\Delta T)^2} + \frac{(\alpha - 1)^2}{2^{2N_g+1}}}. \quad (19)$$

Погрешность нелинейности. Источники нелинейности такие же, как в разделе IIIА, но так как используемая архитектура позволяет выходному сигналу датчика соответствовать входному диапазону АЦП, поэтому влияние нелинейности АЦП в этом случае меньше влияния нелинейности ЧЭ. Поэтому общая нелинейность в основном обусловлена нелинейностью ЧЭ: при 8-разрядном АЦП его нелинейность обычно составляет менее половины величины наименьшего значащего бита, что составляет 0,2% погрешности ВПИ; для сравнения – типичная нелинейность датчика составляет порядка 0,5% от ВПИ:

$$\varepsilon_{NL} = \sqrt{\varepsilon_{NLsens}^2 + \frac{1}{2^{2N+2}}}. \quad (20)$$

Для того же разрешения АЦП погрешность квантования меньше, чем в разделе IIIА, примерно в три раза по сравнению с примером, рассмотренным выше.

Следующая формула дает общую относительную погрешность с учетом всех рассмотренных выше источников, которая характеризует запас системы по ошибке:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\varepsilon_r^2 \left(\frac{T_{CS}^2}{(1 + T_{CS}\Delta T)^2} + \frac{T_{CO}^2}{(S_{pmin}\Delta P)^2} \right) + \varepsilon_{NLsens}^2 + \frac{(\alpha - 1)^2 q^2}{2(S_{pmin}\Delta P)^2} + \frac{(\alpha - 1)^2 + 2}{2^{2N_g+2}}}. \quad (21)$$

Пример. Поскольку диапазон выходного сигнала соответствует полному динамическому диапазону, квантование и нелинейность АЦП становятся пренебрежимо малыми. Поэтому запас по точности очень мало зависит от разрешения АЦП, как показано на рис. 5. Кривые были получены для 8-битных управлений коэффициентом усиления и сигналом смещения.

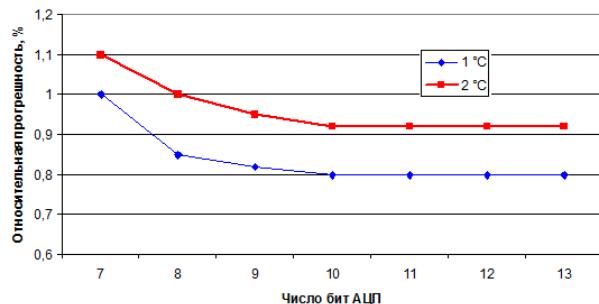


Рис. 5. Относительная погрешность с использованием аппаратной компенсации от разрешения АЦП для погрешностей измерения температуры 1 и 2 °C при 8-битных управлений коэффициентом усиления и сигналом смещения

Для достижения точности лучше, чем 1% ВПИ, при погрешности измерения температуры около 2 °C и разрешении 8 бит для управления сигналом смещения и коэффициентом усиления необходимое разрешение АЦП составляет 8 бит. Точность в основном ограничена нелинейностью ЧЭ датчика, а также (в меньшей степени) погрешностями температуры и разрешением сигнала коррекции смещения. В этом случае ошибки дискретизации и квантования АЦП становятся пренебрежимо малыми.

C. Сравнение двух способов компенсации

При одной и той же точности измерения ее достижение с помощью программной компенсации проще, чем при аппаратной компенсации. Хотя для обеспечения программной компенсации может потребоваться внешний АЦП высокого разрешения (в настоящее время в микроконтроллеры интегрируется АЦП с разрешением до 16 бит, что, безусловно, достаточно для реализации программной компенсации). Тем не менее, компенсация с помощью программного обеспечения занимает процессорное время для выполнения математических вычислений (это ограничение еще более ужесточается необходимостью выполнять вычисления с данными двойной точности, чтобы избежать ошибок округления). В конфигурации аппаратной компенсации время вычисления не теряется для вычисления, за исключением случаев, когда V_{off} и G_{CGA} обновляются, что не является большой проблемой при медленном изменении температуры среды.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении эксперимента был разработан прототип для измерения давления со следующими требованиями: диапазон измеряемого давления от 0 до 35 мбар и диапазон рабочих температур от 0 до 70 °C. В макете использовался датчик давления ДД-М (ОКБ «Сигнал», Энгельс, Саратовская обл.). Математическая модель данного датчика была описана в работе [12]. Влияние температуры на точность его работы было описано в работах [13–15]. Здесь приводятся только результаты тестовых экспериментов по исследованию погрешностей формирователей сигнала датчика на основе программного и аппаратного способов компенсации ошибок.

Компенсации смещения сигнала с помощью программного обеспечения было отдано предпочтение по причинам стоимости макета. Минимальный диапазон выходного сигнала составляет около 2,2 В или 110 единиц младшего значащего бита (МЗБ, LSB).

Калибровка сначала была выполнена с разрешением 8 бит, а затем с разрешением 11 бит, чтобы показать, насколько точность компенсации смещения сигнала зависит от этого параметра. Температуры, при которых проводилась калибровка, составляли $T = 25$ и 70 °C. Измерения проводились при нескольких температурах: $T = 10, 25, 45, 55$ и 70 °C. Хорошая компенсация смещения была получена при $T = 25, 45$ и 70 °C в обоих случаях. Однако была ошибка смещения 1 или 2 МЗБ при $T = 10$ и 55 °C с калибровкой разрешения 8 бит, но эта ошибка была устранена с помощью калибровки при разрешении 11 бит.

Затем измерения проводились при температурах, перечисленных выше, с разрешением калибровки 11 бит. Поскольку давление было приложено к задней стороне

ЧЭ, нелинейность оказалась хуже, чем при давлении, приложенном к верхней части ЧЭ. В этом случае нелинейность составляла примерно 1% от ВПИ. Результаты приведены в таблице, где показаны достигнутые точности с 8-битным АЦП и программной компенсацией. Результаты находятся в пределах теоретической точности; они соответствуют принятой теоретической модели. Однако следует иметь в виду, что эта модель получена с некоторыми ограничениями.

ТАБЛИЦА. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Температура, °C	Погрешность температуры, °C	Точность измерения давления, % ВПИ	Максимальная погрешность, %
10	2	1	1,4
25	0	1	1,1
45	2	1,2	1,4
55	1	1	1,3
70	0	1	1,1

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена разработанная модель для двух типов компенсации смещения сигнала в кремниевых пьезорезистивных датчиках давления. Результаты дают возможность разработчику выбрать нужный формирователь сигнала для конкретного приложения.

Показано, что для получения точности около 1% от ВПИ требуется калибровка коэффициента термокомпенсации T_{CO} . Если эта калибровка не выполняется, нельзя ожидать точности лучше, чем 2,5% от ВПИ. Разброс этого параметра от датчика к датчику действительно сильно влияет на точность измерения.

При выполнении калибровки точность 1% ВПИ обеспечивается на базе вариантов модели обеих архитектур в температурном диапазоне от 0 до 85 °C. При программной компенсации ключевым устройством является АЦП (требуется разрешение АЦП не менее 9 бит); при аппаратной компенсации ключевыми являются устройства обратной связи для управления смещением и усилением (требуется 8-битный ЦАП для управления смещением и 8-битное устройство автоматической регулировки усиления).

В работе также особо отмечено, что при проведении калибровки необходимо иметь аппаратуру с более высоким разрешением, чем разрешение аппаратуры у самого датчика (рекомендуется, чтобы разрешение калибровочных средств было как минимум на 3 бита выше разрешения АЦП датчика). Также показано, что конечная эффективность работы (когда оптимизируется формирователь сигнала компенсации) определяется нелинейностью ЧЭ датчика и погрешностью измерения температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ermakov R.V., A.N. Popov, E.N. Seripal, et al. Methods for testing and test results of inertial sensors intended for operation in helicopter-type aircraft // Proc. of the 24th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017 – St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2017. – P. 335-338.
2. Sensor Device Data Book: 5th Ed. – Freescale Semiconductor, Inc.: Motorola, Inc. 2003. – 670 p.
3. Bryzek J. Principles of MEMS // Handbook of Measuring System Design. – John Wiley & Sons, Ltd, 2005. – P. 720-726.

4. Custodio A., Bragos R., Pallas-Areny R. A Novel Sensor-Bridge-to-Microcontroller Interface // Proc. of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. – Budapest, Hungary, 2001. – Vol. 2. – P. 892-895.
5. Ristic L. Sensor Technology and Devices // Measurement Science and Technology, 2000. – Vol. 11, No. 12. – DOI: 10.1088/0957-0233/11/12/710.
6. Sze S.M. Semiconductor Sensors 1st Edition. – Wiley-Interscience: NY, 1994. – 476 p.
7. Yurish, S.Y., Reverter F., Pallas-Areny R. Measurement error analysis and uncertainty reduction for period-and time interval-to-digital converters based on microcontrollers // Measurement Science and Technology, 2005. – Vol. 16, No.8. – P. 1660-1666.
8. Kress H.-J., Bantien F., Marek J., Willmann M. Silicon pressure sensor with integrated CMOS signal-conditioning circuit and compensation of temperature coefficient // Sensors and Actuators A: Physical, 1991. – Vol. 25, Iss. 1–3. – P. 21-26.
9. Chee C., Tong L., Steven G.P. A Review on the Modelling of Piezoelectric Sensors and Actuators Incorporated in Intelligent Structures // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 1998. – Vol. 9, No. 1. – P. 3-19.
10. Yao Z., Liang T., Ji P. A High-Temperature Piezoresistive Pressure Sensor with an Integrated Signal-Conditioning Circuit // Sensors. – 2016. – Vol. 16, No. 6. – P. 913-923.
11. Kress J., Bantien F., Marek J., Willmann M. Integrated silicon pressure sensor for automotive application with electronic ~trimming // SAE Technical Paper 950533, 1995. – P. 35-42. – <https://doi.org/10.4271/950533>.
12. Дробынин М.Е., Львов П.А., Ивченко С.П. и др. Исследование влияния температурных эффектов на работу пьезорезистивного датчика давления // Системный синтез и прикладная синергетика: сб. тр. IX Всерос. научн. конф. – 2019. – Р. 578-589.
13. Львов А.А., Коновалов Р.С., Львов П.А. Повышение точности пьезорезистивных датчиков давления // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): Сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Т. 2. – Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – С. 149-158.
14. Дробынин М.Е., Львов П.А., Львов А.А., Торопова О.А. Компенсация температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления с помощью полумостовой схемы: результаты эксперимента // Надежность и качество: сб. тр. Междунар. Симп.: в 2 т. Т. 2. – Пенза: ПГУ, 2018. – С. 409-413.
15. Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А. др. Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (77). – С. 154-160.

Порядок использования индивидуального и зондирующего вызова в системе радиосвязи второго поколения стандарта mil-std-188-141b для последующего измерения качества принятого ALE сигнала

Цимбал Владимир Анатольевич
ФВА РВСН им. Петра Великого
Серпухов, Россия
tsimbalva@mail.ru

Попов Михаил Юрьевич
ФВА РВСН им. Петра Великого
Серпухов, Россия
mptorov.81@mail.ru

Калач Петр Константинович
ФВА РВСН им. Петра Великого
Серпухов, Россия
doctorkst@mail.ru

Попов Роман Вячеславович
ФВА РВСН им. Петра Великого
Серпухов, Россия

Киреев Дмитрий Алексеевич
ФВА РВСН им. Петра Великого
Серпухов, Россия

Аннотация. Раскрыт порядок использования индивидуального и зондирующего вызова в системе радиосвязи второго поколения стандарта MIL-STD-188-141B для последующего измерения качества принятого ALE сигнала.

Annotation. The procedure for using an individual and sounding call in a second generation radio communication system of the MIL-STD-188-141B standard for subsequent measurement of the quality of the received ALE signal is disclosed in detail.

Ключевые слова. Измерение качества сигнала, ALE слово, стандарт MIL-STD-188-141B.

Keywords. Signal quality measurement, ALE word, MIL-STD-188-141B standard.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации ведутся работы по совершенствованию и созданию, как отдельных структурных элементов систем коротковолновой радиосвязи, так и отдельных коротковолновых радиотрактов, необходимых для организации и обеспечения доставки передаваемой информации до территориально разнесенных объектов инфраструктуры. В настоящее время существует потребность в анализе оперативности доставки передаваемой информации между абонентскими станциями по коротковолновому радиоканалу с использованием существующих протоколов и разработке коротковолнового протокола передачи данных, реализующего функцию настройки своих регулируемых параметров в зависимости от системных показателей процесса доведения.

Существующая система радиосвязи второго поколения стандарта MIL-STD-188-141B способная автоматически измерить качество принятого ALE слова (сигнала) и предоставить отчет о текущем качестве канала связи по средствам индивидуального вызова, что в свою очередь позволяет существенно увеличить оперативности

доставки передаваемой информации между абонентскими станциями, путем выбора наилучшего канала передачи информации.

Для формализации рассматриваемого процесса введены следующие обозначения, представленные в табл. 1 и допущения.

ТАБЛИЦА 1. Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
P_{E_MFSK}	- вероятности символьной ошибки для равновероятного 8FSK ортогонального сигнала с некогерентным детектированием.
$\frac{E_b}{N_0}$	- отношение энергии на двоичный символ/спектральная плотность мощности шума в канале связи [дБ].
P_{B_MFSK}	- вероятности битовой ошибки для равновероятного 8FSK ортогонального сигнала с некогерентным детектированием.
$\frac{E_s}{N_0}$	- отношение энергии кодового символа к спектральной плотности мощности.
$\frac{E_B}{N_0}$	- отношение энергии кодового бита к спектральной плотности мощности.
P_{B_M}	- вероятность битовой ошибки при мажоритарном режиме «2 из 3».
P_B	- вероятности битовой ошибки для расширенного кода Голея.
$K_{ ошиб.}$	- количество неисправленных битовых ошибок.

II. СТРУКТУРА ALE СЛОВА

Все ALE слова состоят из фреймов, которые строятся из соседних избыточных слов, расположенных в определенной последовательности (последовательностях). Существует три этапа вызова: цикл вызова, сообщение и завершение.

На рис. 1 показана структура фрейма при передаче сообщения о качестве канала связи с использованием индивидуального вызова.

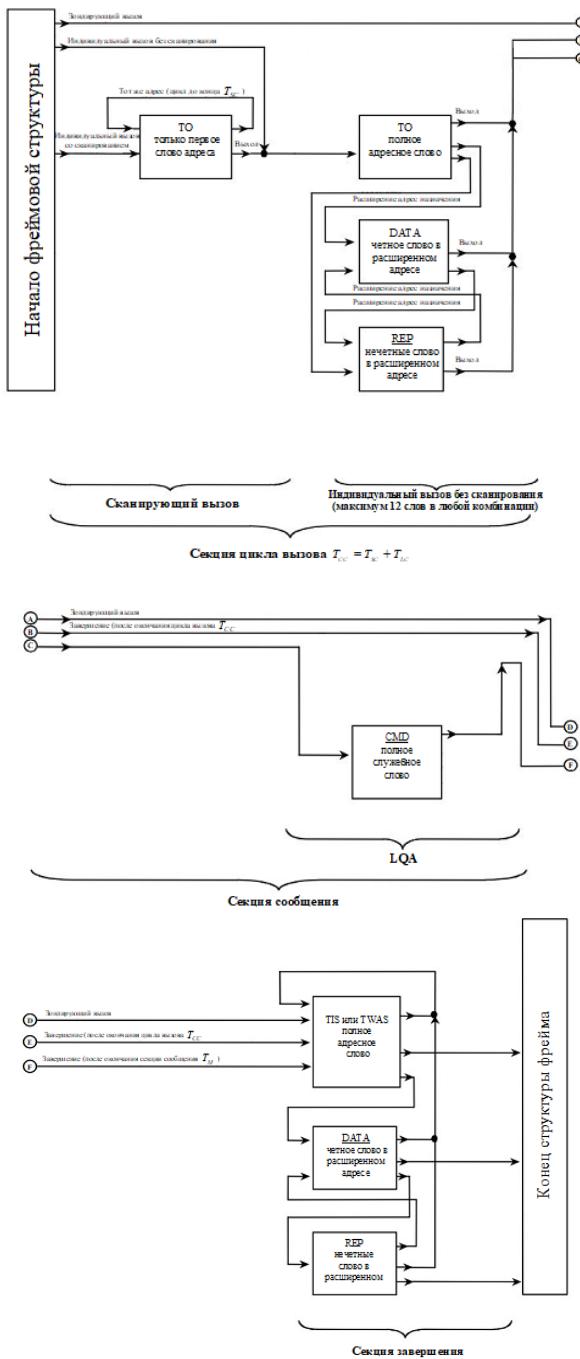


Рис. 1. Структура фрейма.

A. Индивидуальный вызов.

После выбора канала для вызова,зывающая станция *SAM* начинает прослушивать канал, чтобы избежать «вмешательства в работу активных каналов», а затем настройку. Если известно, что вызываемая станция *JOE* слушает (ожидает вызова) на выбранном канале (не сканирует), станция вызова должна передать одноканальный вызов, который содержит только начальный вызов и завершение (см. верхний фрейм на рис. 2). В противном случае посыпается сканирующий вызов T_{sc} , который предшествует начальному вызову, со сканированием дос-

таточной длительности, чтобы «захватить» приемник вызываемой станции в процессе её сканирования (нижний фрейм на рис. 2). Продолжительность этого начального сканирования составляет $2T_{rw}$ для каждого канала, который сканирует вызывающая станция. Секция сканирующего содержит только первое слово адреса вызываемой станции с использованием преамбулы *TO* и с повторением его по мере необходимости до конца секции сканирующего вызова.

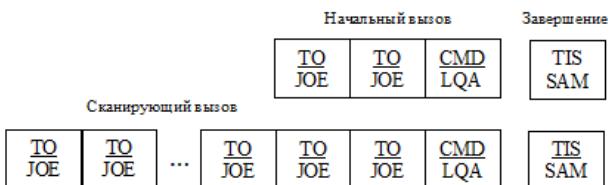


Рис. 2. Индивидуальный вызов.

Сообщение *CMD LQA* посылаются сразу же после начального вызова, а за ним следует завершение, содержащее полный адрес вызывающей станции *TIS SAM*. Вызывающая станция ожидает ответа в течении T_{rw} , что включает ожидаемую задержку на прохождение сигнала туда и обратно и обратное время для вызываемой станции.

Если ожидаемый ответ от вызываемой станции не начинает поступать в пределах заданного интервала ожидания ответа T_{rw} , попытка вызова на этом канале считается неудачной. При этом, если другие каналы в сканируемом наборе не проверялись, предпринимается попытка вызова на новом канале. В противном случае *ALE* контроллер возвращается в исходное состояние и уведомляет оператора вызывающей станции или сетевой контроллер о неудачной попытке соединения.

Прием индивидуального вызова.

Вызываемая станция *JOE* пытается обнаружить *ALE* слова (сигналы) вызывающей станции *SAM* в пределах своего периода сканирования канала T_s . Если вызываемая станция *JOE* получила *ALE* слова *TO JOE*, *ALE* контроллер прекращает сканирование, переходит в состояние установления соединения и продолжает чтение *ALE* слов, ожидая заданное время T_{wce} до окончания сканирующего вызова и начала секций сообщения или завершения фрейма. Вызываемая станция немедленно прерывает установление соединения и возвращается к своему предыдущему состоянию при возникновение любого из перечисленных обстоятельств:

- вызываемая станция не принимает секции сообщения или завершения фрейма в пределах T_{wce} или секцию завершения фрейма в пределах T_{mmx} после начала секции сообщения фрейма;
- получена любая недействительная последовательность преамбулы *ALE* слова;
- завершение фрейма не обнаружено в пределах T_{ww} после первого *ALE* слова завершения.

Если секция сообщения начинаются в пределах T_{WCE} , вызываемая станция *JOE* попытается получить одно или более полных сообщений в пределах нового заданного ограниченного времени T_{MAX} .

Если завершение фрейма начинается с *TIS SAM*, вызываемая станция пытается получить адрес вызывающей станции *SAM* в пределах нового заданного ограниченного времени T_{XMAX} .

Если получена приемлемая последовательность завершения с *TIS*, вызываемая станция при поиске дополнительных адресных слов (если таковые имеются) и конца фрейма (при отсутствии обнаруженного слова) начинает отсчет периода «ожидания последнего *ALE* слова» $T_{LWW} = T_{RW}$, который запускает процедуру ее ответа.

Если все вышеописанные критерии удовлетворены, вызываемая станция *JOE* немедленно инициирует ответ после обнаружения завершения вызова, если оператором или контроллером не предписано иначе.

B. Ответ на индивидуальный вызов

После получения запроса на подключение, вызываемая станция слушает канал на предмет наличия другого трафика. Если канал не занят, станция *JOE* настраивается и посыпает ответ (рис.3), дополнительно запуская таймер ожидания ответа T_{WR} . Если канал используется, *ALE* контроллер игнорирует вызов и возвращается в свое предыдущее состояние, если не запрограммирован иначе.

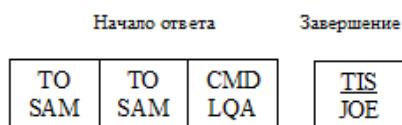


Рис. 3. Ответ на индивидуальный вызов

Если вызывающая станция *SAM* успешно получила начало соответствующего ответа *TO SAM*, ожидаемого в пределах T_{WR} , она обрабатывает остальную часть фрейма в соответствии с временными интервалами, описанными выше в отношении вызова, до тех пор, пока не разорвает установленное соединение или не примет соответствующее завершение, которым в этом примере является *TIS JOE*. Вызывающая станция немедленно прекращает установление связи после возникновения любой из следующих причин:

- вызывающая станция *SAM* не принимает соответствующего цикла ответного вызова, начинаяющегося в пределах интервала времени ожидания T_{WR} ;
- получена недействительная последовательность преамбул *ALE* слова;
- вызывающая станция *SAM* не получила соответствующего завершения вызова *TIS JOE*, начинаяющегося в пределах T_{LC} (плюс T_{MAX} , если была отправлена секция сообщения);

- завершение фрейма не обнаружено в пределах T_{LWW} , (плюс дополнительные несколько T_{RW} в случае расширенного адреса).

После прерывания установления соединения по любой из вышеупомянутых причин вызывающая станция, повторяет вызов, на другом канале.

Если вызывающая станция *SAM* принимает надлежащее завершение от вызываемой станции *TIS JOE*, в пределах T_{LC} (плюс T_{MAX} , если была отправлена секция сообщения), она запускает таймер ожидания последнего слова, как было указано выше, и подготавливает отправку подтверждения.

Если вместо этого получено *TWAS JOE*, т.е. вызываемая станция отклонила попытку вызова, то *ALE* контроллер вызывающей станции прерывает попытку установления соединения и информирует оператора об отклоненной попытке.

C. Подтверждение.

Если все вышеперечисленные критерии приемлемого ответа удовлетворены, *ALE* контроллер вызывающей станции информирует оператора о получении правильного ответа и высылает *ALE* квитанцию (рис.4).

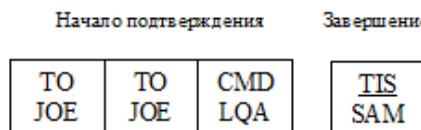


Рис.4. Подтверждение

Если вызываемая станция *JOE* успешно прочитывает начало соответствующей квитанции, начинающееся в пределах ее времени ожидания T_{WR} , она обрабатывает остальную часть фрейма в соответствии временными интервалами, описанными выше в отношении ответа, пока она или не разорвет установление соединения, или не примет соответствующее завершение. Вызывающая станция немедленно прекращает установление связи после возникновения любой из следующих причин:

- вызывающая станция *JOE* не принимает соответствующего цикла ответного вызова *TO JOE*, начинаяющегося в пределах времени ожидания T_{WR} ;
- принята недействительная последовательность преамбул *ALE* слов;
- вызывающая станция *JOE* не принимает соответствующего заключения *TIS SAM*, начинающегося в установленных пределах (плюс T_{MAX} , если была отправлена секция сообщения);
- завершение фрейма не обнаружено в пределах T_{LWW} , (плюс дополнительные несколько T_{RW} в случае расширенного адреса).

Если установление соединения прервано по любой из вышеупомянутых причин, это установление соединения считается неудачным и *ALE* контроллер вызываемой

станции возвращается к состоянию до попытки установления соединения. Вызываемая станция уведомляет оператора или контроллер о неудавшейся попытке установления соединения.

Система радиосвязи второго поколения стандарта MIL-STD-188-141B способна автоматически измерить качество принятого ALE слова и предоставить отчет о текущем качестве канала связи по средствам зондирующего вызова.

D. Зондирующий вызов

На рис. 5 показана базовая структура зондирующего сигнала.

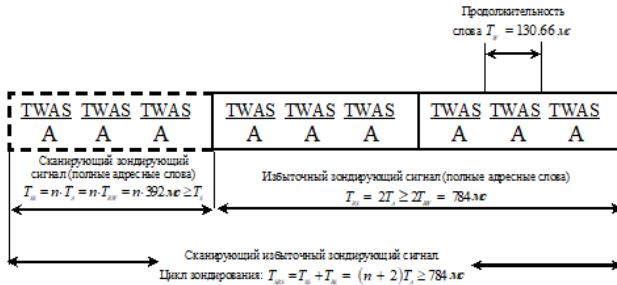


Рис. 5. Базовая структура зондирующего сигнала

E. Зондирование

Зондирующий сигнал – это односторонняя передача без обратной связи, выполняемая через периодические интервалы на незанятых каналах. Для ее осуществления к контроллеру добавляют таймер, который периодически инициирует зондирующие сигналы (если канал свободен). При зондировании используются стандартные ALE слова (сигналы), причем зондирующие сигналы могут быть приняты любой станцией.

Структура зондирующего сигнала фактически идентична структуре индивидуального вызова, однако нет необходимости в цикле вызова и отсутствует секция сообщения. Необходимо только послать завершение, которое идентифицирует передающую станцию (рис. 5). Типы слов – TIS или TWAS (но никогда оба) – указывают на то, если ли необходимость в обратном ответе. Минимальное избыточное время зондирования T_{RS} равно продолжительности начального вызова стандартного однословного адреса T_{LC} .

F. Зондирование одного канала.

Станции используют протокол зондирования для одноканального зондирования, отслеживания способности к подключению и для широковещания об их готовности к вызовам и осуществлению трафика. Последовательности для сканирования каналов и критерии выбора для индивидуального сканирующего вызова распространяются и на сканирующее зондирование. Каналы, которые будут зондироваться, называются «зондируемым набором», и обычно совпадают с «сканируемым набором», который используется для сканирования (рис. 6).

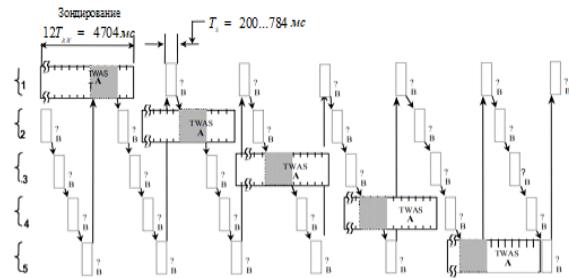


Рис. 6. Зондирование

На рис. 6, станция “А” производит зондирование, а станция “В” сканирует в обычном режиме. Если станция “А” планирует игнорировать вызовы (от “В”), которые могут последовать за сигналом сканирующего зондирования от “А”, необходимо использовать протокол сканирующего зондирования с отклонением вызова. При использовании индивидуального зондирующего вызова станция “А” занимает первый канал в сканируемом наборе, ожидает T_{WT} , чтобы убедиться, что канал свободен, подстраивает свой элемент связи за T_s , выходит на полную мощность, и начинает фрейм, состоящий из суммы временных интервалов избыточного сканирующего и зондирующего сигналов T_{SRS} . Этот зондирующий сигнал вычисляется так, чтобы он превосходил период сканирования T_s станции “В” по меньшей мере на время избыточного зондирования T_{RS} , что обеспечит превышение доступного периода обнаружения T_{DRW} . На примере с пятью каналами, когда станция “В” сканирует 5 каналов в секунду, “А” выдает зондирующий сигнал по меньшей мере в течение $12T_{RW}$. После завершения передачи фрейма сканирующего зондирования “А” немедленно покидает канал и переходит на следующий канал в сканируемом наборе. Эта процедура повторяется до тех пор, пока все каналы не будут прозондированы или пропущены в случае их занятости. Когда станция ALE вызова исчерпает все заранее запланированные каналы из сканируемого набора, она должна автоматически возвратиться в нормальный режим сканирования с «доступным» приемом.

Как показано на рис. 6, синхронизация работы как “А”, так и “В” заранее спланирована так, чтобы обеспечить возможность для станции “В” на каждом канале обнаружить зондирующий сигнал от “А” (три (с избытком) TWAS A ($(3 - 4T_w)$)). Далее станция “В” запоминает информацию о способности к подключению, и немедленно покидает канал, возобновляя сканирование.

Если станция “А” осуществляет зондирование и требуется установления соединения с этой же станцией, используется протокол одноканального вызова. Вызывающая станция “В” начинает вызов немедленно после того, как определит, что передающая станция “А” закончила свою передачу. Времени ожидания перед периодом передачи не требуется. Поэтому, если станция “В” получила зондирующий сигнал от станции “А”, а станции “А” так-

же необходимо проанализировать качество канала связи со станцией “B”, то “B” немедленно производит вызов с использованием протокола одноканального вызова (процедура вхождения в связь описана выше).

III. КОДИРОВАНИЕ ALE СЛОВА

Эффективная работа станций при соединении по ненадежным радиочастотным каналам основана на комплексном использовании кодирования и интерликинга (перемешивания). В стандарте MIL-STD-188-141B используется кодирование (прямое исправление ошибок (FEC)) реализующие расширенным кодом Голея (24,12,3).

Порождающий полином иметь вид:

$$g(x) = x^{11} + x^9 + x^7 + x^6 + x^5 + x + 1.$$

Порождающая матрица G , полученная из $g(x)$, содержит единичную матрицу I_{12} и матрицу проверки четности P , как показано на рис.7.

I_{12}												P													
100	000	000	000	:	101	011	100	011				110	100	010	001	111	011	100	011	110	100	010	001		
010	000	000	000	:	111	110	010	010				010	000	000	000	111	110	010	010	000	110	001	110	110	
001	000	000	000	:	110	100	101	011				000	100	000	000	110	001	110	110	000	110	001	111	000	
000	100	000	000	:	110	001	110	110				000	000	010	000	101	101	111	000	000	100	001	011	110	
000	010	000	000	:	110	011	011	001				000	000	000	100	001	011	011	110	000	000	001	011	110	
000	001	000	000	:	011	001	101	101				000	000	000	000	001	010	011	000	000	000	001	011	110	
$G =$	000	000	100	000	:	001	100	110	111				000	010	000	000	101	101	100	110	010	010	101	100	110
	000	000	010	000	:	101	101	111	000				000	001	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
	000	000	001	000	:	010	110	111	100				000	000	010	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
	000	000	000	100	:	001	011	011	010				000	000	001	011	011	010	010	010	010	010	010	010	010
	000	000	000	010	:	101	110	001	001				000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
	000	000	000	001	:	010	111	000	000				000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000

Рис. 7. Порождающая матрица

Соответствующая проверочная матрица H проверки четности содержит транспонированную матрицу P^T и единичную матрицу I_{12} , как показано на рис.8.

P^T												I_{12}														
111	110	010	010	:	100	000	000	000				111	110	010	010	100	000	000	000	000	000	000	000	000		
011	111	001	001	:	010	000	000	000				011	111	001	001	100	000	000	000	000	000	000	000	000		
110	001	110	110	:	001	000	000	000				110	001	110	110	000	100	000	000	000	000	000	000	000		
011	000	111	011	:	000	100	000	000				011	000	111	011	000	000	100	000	000	000	000	000	000	000	
110	010	001	111	:	000	010	000	000				110	010	001	111	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
100	111	010	101	:	000	001	000	000				100	111	010	101	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
101	101	111	000	:	000	000	100	000				101	101	111	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
010	110	111	100	:	000	000	010	000				010	110	111	100	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
001	011	011	110	:	000	000	000	001				001	011	011	110	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
000	101	101	111	:	000	000	000	000				000	101	101	111	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
111	100	100	101	:	000	000	000	000				111	100	100	101	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
101	011	100	011	:	000	000	000	000				101	011	100	011	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000

Рис. 8. Проверочная матрица

При кодировании используется фундаментальная формула $x = uG$, где кодовая комбинация x получается из информационного слова u и порождающей матрицы G . Кодирование выполняется с использованием матрицы G путем суммирования (по модулю 2) строк G , для которых соответствующий информационный бит равен «1». (рис. 9.).

12 кодируемых битов	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
Номер бита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
→													
Номера строк	1												
матрицы 'G'	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
	7												
	8												
	9												
	10												
	11												
	12												

110	100	010	101	010	101	100	110	010	110	100	110	110	110
КОДИРОВАННЫЕ БИТЫ ДАННЫХ*													
W ₁ ...W ₁₂ (ИЛИ W ₁₃ ...W ₂₄)													
Г1...Г12 (ИЛИ Г13...Г24)													

ПОСЫЛАЕМОЕ КОДОВОЕ СЛОВО ИЗ 24 БИТОВ

Рис. 9. Пример кодирования слова с использованием кодировки Голея

При декодировании используется уравнение $s = yH^T$, где $y = x + e$ – полученный вектор, который является суммой по модулю 2 кодового слова x и вектора e ошибок, а s – вектор из “ $n - k$ ” битов, называемый синдромом. Значение H показано на рис.8. Каждый вектор e корректируемой/обнаружимой ошибки дает в результате уникальный вектор s . Поэтому s вычисляется согласно вышеуказанному уравнению и используется для индексации поиска соответствующего вектора e , который затем складывается по модулю 2 с y , давая исходное кодовое слово x .

IV. ИНТЕРВИЛЛНГ ALE СЛОВА

Основные биты слова от старшего значащего бита (MSB) W_1 до младшего значащего бита (LSB) W_{24} и результирующие биты FEC Голея от G_1 до G_{24} (от G_{13} до G_{24} инвертированы), до передачи, подвергаются интерликингу с использованием схемы, показанной на рис.10. При которой, 48 чередующихся битов, плюс 49-й заполняющий бит $S49$, (значение = 0) составляют переданное ALE слово. Последовательность передачи, следующая: $A1, B1, A2, B2 \dots A24, B24, S49$ с использованием 8FSK и 16-1/3 символов (тонов) на слово. Каждое из переданных 49 битовых (или 16 символьных) слов посыпается с 3-кратным повторением для уменьшения влияния фединга, интерференции и шума.

Приемник накапливает три слова ALE осуществляет побитную мажоритарную их обработку по схеме 2 из 3. В результате такой процедуры формируются, следующие данные, которые представлены на рис.11.

В результате проведения мажоритарного голосования 2 из 3 сформировано 48 (49-й бит игнорируется) бит (мажоритарное слово), структура его представлена на рис 12. Далее осуществляется процедуры деинтерликинга и декодирования.

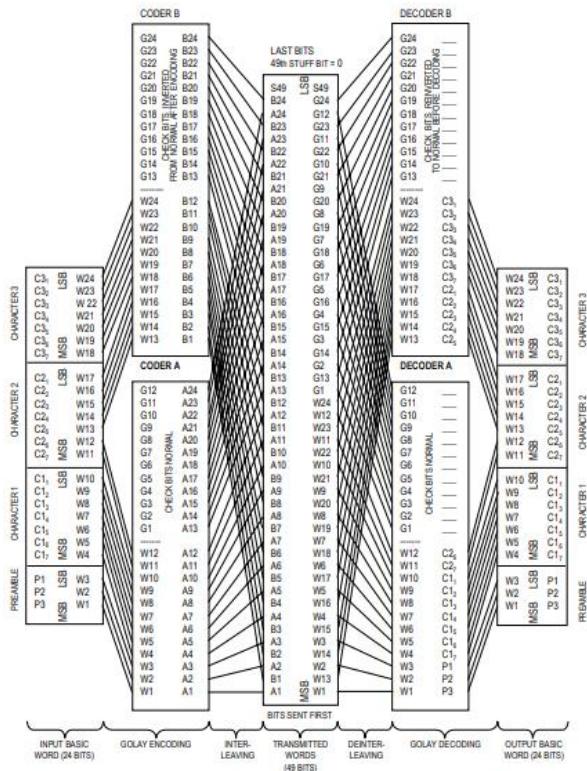


Рис. 10. Схема интерлидинга

Полученный бит R	Время получения	Восемь возможных комбинаций ошибок
R (n) (сейчас)	T	0 0 0 0 1 1 1 1
R (n-49) (ранее)	T-130.66... мс	0 0 1 1 0 0 1 1
R (n-98) (ранее)	T-261.33... мс	0 1 0 1 0 1 0 1
Результирующий мажоритарный бит M		0 0 0 1 0 1 1 1
Возможный флаг ошибки:		
0 = ошибка маловероятна		0 1 1 1 1 1 1 0
1 = ошибка вероятна		

Рис. 11. Декодирование с 2 из 3 мажоритарным голосованием

Относительное Время	Полученные биты R (время) для 2/3-мажоритарного голосования			бит мажоритарного слова	Биты, используемые для декодирования
Заполняющие биты	R (n)	R (n-49)	R (n-98)	M (n)	S49 игнорируется
Недавний (младший значащий бит)	R (n-1)	R (n-50)	R (n-99)	M (n-1)	B24 (LSB)
	R (n-2)	R (n-51)	R (n-100)	M (n-2)	A24
	R (n-3)	R (n-52)	R (n-101)	M (n-3)	B23
	R (n-4)	R (n-53)	R (n-102)	M (n-4)	A23

	R (n-46)	R (n-95)	R (n-144)	M (n-46)	A2
Более старый (старший значащий бит)	R (n-47)	R (n-96)	R (n-145)	M (n-47)	B1
	R (n-48)	R (n-97)	R (n-146)	M (n-48)	A1 (MSB)

Рис. 12. Структура мажоритарного слова

V. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВО ПРИНЯТОГО ALE СИГНАЛА

Допущение 1. Вероятности битовой ошибки в ALE слове постоянная величина, а появление ошибки равновероятно и независимо (результат нескольких этапов повышения достоверности передаваемой информации, реализованных в протоколе).

Допущение 2. Расширенный код Голея (24,12) работает в режиме жесткого декодирования со способностью обнаружения 4-х ошибок и исправления 3-х.

Этапы определения аналитического выражения.

A. Определение вероятности символьной ошибки для равновероятных M-арных ортогональных сигналов с некогерентным детектированием.

Вероятность символьной ошибки для равновероятных M-арных ортогональных сигналов с некогерентным детектированием рассчитывается следующим выражением:

$$P_{E_{MFSK}} \leq \frac{1}{M} \exp\left(-\frac{E_s}{N_0}\right) \sum_{j=2}^M (-1)^j \binom{M}{j} \exp\left(\frac{E_s}{jN_0}\right), \quad (1)$$

где

$$\binom{M}{j} = \frac{M!}{j!(M-j)!}$$

является стандартным биномиальным коэффициентом, выражающим число способов выбора j ошибочных символов из M возможных;

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{E_{B_{MFSK}}}{N_0} \log_2 M,$$

энергия, приходящая на символ, а M – размер множества символов.

Соотношение между вероятности битовой ошибки и вероятность символьной ошибки для ортогональных M -арных сигналов описывается следующем выражением:

$$P_{E_{B_{MFSK}}} = \frac{\frac{M}{2}}{M-1} \quad (2)$$

Объединяя выражения (1) и (2) вероятность ошибочного бита можно определить следующим образом:

$$P_{B_{MFSK}} \leq \frac{1}{M} \exp\left(-\frac{E_{B_{MFSK}}}{N_0} \log_2 M\right) \times \sum_{j=2}^M (-1)^j \binom{M}{j} \exp\left(\frac{E_{B_{MFSK}}}{jN_0} \log_2 M\right), \quad (3)$$

B. Определение вероятности появления битовой ошибки при мажоритарном голосовании 2 из 3.

Общая запись мажоритарной системы k из N , при условии, что все элементы равно вероятны:

$$P_{B_{M}} = \sum_{i=k}^N C_N^i P_{B_{MFSK}}^i (1 - P_{B_{MFSK}})^{N-i}, \quad (4)$$

где

$$C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!} \text{ - количество сочетаний из } N \text{ по } i.$$

Тогда при мажоритарном голосовании 2 из 3 выражение (4) примет вид:

$$P_{B_{M}} = \sum_{i=2}^3 C_3^i P_{B_{MFSK}}^i (1 - P_{B_{MFSK}})^{3-i} = \\ = 3P_{B_{MFSK}}^2 - 2P_{B_{MFSK}}^3 \quad (5)$$

C. Определение вероятности битовой ошибки для расширенного кода Голея при условии жесткого декодирования через функцию вероятности ошибки в канальном символе с учетом мажоритарного голосования 2 из 3.

В соответствии с допущением 2 расширенный код Голея работает в режиме жесткого декодирования со способностью обнаружения 4-х ошибок и исправления 3-х. Тогда вероятность битовой ошибки для расширенного кода Голея можно представить как функцию вероятности ошибки в канальном символе с учетом мажоритарного голосования 2 из 3.

$$P_B = \frac{1}{24} \sum_{j=3}^{24} j \binom{24}{j} P_{B_M}^j (1 - P_{B_M})^{24-j}. \quad (6)$$

VI. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВО БИТОВЫХ ОШИБОК ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КАНАЛА СВЯЗИ

После того, как ALE приемник доходит до синхронизации слов, все полученные слова оценены, и среднее линейное значение битовых ошибок вычисляется следующим образом:

если декодер Голея не сообщает ни о каких непоправимых ошибках (7) в обеих половинах ALE слова, количество отрицательных голосов, обнаруженных в слове, должно прибавляться к общему количеству.

если по меньшей мере одна половина ALE слова содержала непоправимые ошибки, количество отрицательных обнаруженные голосов должно быть проигнорировано, а к общему количеству нужно добавить 48 (максимальную величину).

Количество неисправленных битовых ошибок в переданном слове после устранения интерлидинга и декодирования Голея:

$$K_{\text{ошиб.}} = 24P_{B_{\text{декодер_A}}} + 24P_{B_{\text{декодер_B}}}, \quad (7)$$

В конце передачи, общее количество полученных битовых ошибок обнаруженных при мажоритарном голосовании 2 из 3 нужно разделить на количество полученных слов, и результат о качестве связи сохраняется в таблицу памяти LQA (рис. 13), как последний BER код для станции, посылающей измеренный сигнал передачи, и для канала, по которому эта передача была осуществлена. Соответствие фактическим значениям BER показано в табл. 2.

		КАНАЛЫ					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
A	ОТ	10	4	1	0	5	15
	К	14	8	2	X	7	11
B	ОТ	9	5	1	3	2	6
	К	X	7	4	3	5	12
C	ОТ	30	22	13	8	3	18
	К	X	-	17	6	2	-
D	ОТ	1	2	5	12	20	-
	К	-	4	7	15	21	-
E	ОТ	-	2	6	7	10	-
	К	X	14	6	9	12	X

Rис. 13. Пример таблицы LQA памяти

Выбор канала для отдельной станции для установления связи.

При выборе канала для двухсторонней связи необходимо учитывать измеренное качество связи для обоих направлений на каждой частоте. На рис. 13 представлен простой пример LQA памяти.

Если требуется установление связи со станцией «В», наилучшим был бы канал C3, поскольку оценку по «пропаданию сигнала туда и обратно» (двусторонняя оценка) равна 5 (1+4), канал C4 является вторым из лучших с оценкой 6 (3+3), далее C5 (7), C2 (12), и C6 (18). Попытка соединения должна проводиться в следующем порядке (C3, C4, C5, C2, и C6).

C1 должен быть оставлен напоследок из-за значка “x”, который указывает, что последняя попытка связи по этому каналу не удалась. Аналогично, попытка вызвать станцию «А» дает нам последовательность C3 (3), C5 (12), C2 (12), C1 (24), C6 (26), и C4 (x). В этом случае каналы C5 и C2 эквивалентны (оба - 12), но C5 выбран раньше, поскольку тракты были более сбалансированы (LQA значения ближе друг к другу).

Выбор канала для отдельной станции для одностороннего широковещания.

Если вместо установления соединения требуется только односторонняя передача сообщения, нужно придать больший вес секция «К».

В рассмотренном примере для вещания на «В» последовательностью должна быть C4 (3), C3 (4), C5 (5), C2 (7), C6 (12) и C1 (x).

ТАБЛИЦА 2. ПРИБЛИЗИТЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОШИБОЧНЫХ БИТОВ BER

Среднее (2/3) подсчитанных голосов	Передаваемые LQA битами					Приблизительно BER _о
	MSB _о	BE4 _о	BE3 _о	BE2 _о	BE1 _о	
0	BE5 _о	BE4 _о	BE3 _о	BE2 _о	BE1 _о	о
0с	0с	0с	0с	0с	0с	0.03
1с	0с	0с	0с	0с	1с	0.006993с
2с	0с	0с	0с	1с	0с	0.01409с
3с	0с	0с	0с	1с	1с	0.02129с
4с	0с	0с	1с	0с	0с	0.02860с
5с	0с	0с	1с	0с	1с	0.03602с
6с	0с	0с	1с	1с	0с	0.04356с
7с	0с	0с	1с	1с	1с	0.05124с
8с	0с	1с	0с	0с	0с	0.05904с
9с	0с	1с	0с	0с	1с	0.06699с
10с	0с	1с	0с	1с	0с	0.07508с
11с	0с	1с	0с	1с	1с	0.08333с
12с	0с	1с	1с	0с	0с	0.09175с
13с	0с	1с	1с	0с	1с	0.1003с
14с	0с	1с	1с	1с	0с	0.1091с
15с	0с	1с	1с	1с	1с	0.1181с
16с	1с	0с	0с	0с	0с	0.1273с
17с	1с	0с	0с	0с	1с	0.1368с
18с	1с	0с	0с	1с	0с	0.1464с
19с	1с	0с	0с	1с	1с	0.1564с
20с	1с	0с	1с	0с	0с	0.1667с
21с	1с	0с	1с	0с	1с	0.1773с
22с	1с	0с	1с	1с	0с	0.1882с
23с	1с	0с	1с	1с	1с	0.1995с
24с	1с	0с	0с	0с	0с	0.2113с
25с	1с	0с	0с	0с	1с	0.2236с
26с	1с	0с	0с	1с	0с	0.2365с
27с	1с	1с	0с	1с	1с	0.2500с
28с	1с	1с	1с	0с	0с	0.2643с
29с	1с	1с	1с	0с	1с	0.2795с
30 (или больше)с	1с	1с	1с	1с	0с	0.3 (или больше)с
~с	1с	1с	1с	1с	1с	нет доступного значенияс

Выбор канала для отдельной станции для прослушивания.

При выборе канала для прослушивания другой станции, нужно придать больший вес секции «ОТ». В рассмотренном примере для прослушивания станции «А» канал C4 (0) был бы наилучшим, а если нужно отсканировать только три канала, то это должны быть C4, C3, и C2.

Выбор канала для нескольких станций.

Станция также способна к выбору наилучшего канала для того, чтобы вызвать или слушать несколько станций, на основе данных, хранимых в *LQA* памяти.

В соответствии с рис. 13, если требуется установление связи со станциями «B», и «C», наилучшим выбором будет C5, поскольку ему соответствует полная оценка 12 (2+5+3+2), далее следуют C4 (20) и C3 (35). Затем следовали бы C2 (34+) и C6 (36+). Такая последовательность обусловлено тем, что для каналов C2 и C6 способность к установлению соединения не проводилась. Последним для испытания стоит C1 (x), поскольку недавняя попытка установления соединения потерпела неудачу как для станции «B», так и для станции «C». Если требуется вызвать три станции «A», «B», и «C», последовательностью будет C5 (24), C3 (38), C2 (46 +), C6 (62 +), C4 (один x) (недавняя неудачная попытка) и, наконец, C1 (два x).

Так же возможно использование дополнительного фактора выбора, что приведет к изменению последовательность выбора канала. К примеру, для вызова «D» и «E» последовательностью была бы C2, C3, C4, C5, C1 и C6. Однако если для любого тракта задан максимальный предел *LQA* <14 (задавая нижний уровень качества связи), для попытки соединения были бы выбраны только C2 и C3.

Если требуется обеспечить широковещание к нескольким станциям, то приоритет следует отдать оценкам из секции «K». В рассмотренном примере для широковещания на «B» и «C» последовательность должна быть C5 (7), C4 (9), C3 (21), C2 (7+), C6 (12+), и C1 (два x).

Чтобы выбрать каналы для прослушивания нескольких станций, следует отдать приоритет оценке в секции OT («от» станции). В рассмотренном примере для прослушивания станций «A» и «B» наилучшим был бы канал C2 (2), а если нужно сканировать только четыре канала, то это будут C2, C3, C4, и C5.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определен порядок анализа канала связи, реализуемый в существующем стандарте MIL-STD-188-141B. На его базе предоставлено аналитическое выражение по

определению количества битовых ошибок системы радиосвязи второго поколения стандарта MIL-STD-188-141 и раскрыт алгоритм их подсчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Протокол MIL-STD-188-141B. Приложение A.
2. *Tsimbal V. et al.* Synthesis of Transient Probabilities of Absorbing Final Markov Chain Describing Traffic Management Protocol Process of the Mil-std-188-141b Standard to Ensure the Probability-time Characteristic Requirements // 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – 2020. – Р. 1-4. – DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213298.
3. Попов М.Ю. Деркач А.М. Коробов А.А., Калач П.К. Формальная постановка задачи моделирования протокола управления трафиком стандарта mil-std-188-141b // Сборник научных трудов / под ред. Заслуженного деятеля науки РФ, почетного радиостроителя РФ, доктора технических наук, профессора В.А. Цимбала и д-ра техн. наук, профессора О.И. Атакищева. МОУ «Института инженерной физики». – Серпухов, 2019. – Вып. № 6. – С. 277-281.
4. Цимбал В.А. Попов М.Ю. Чайков С.С., Калач П.К. Синтез переходных вероятностей ПКМЦ, описывающей процесс работы протокола управления трафиком стандарта mil-std-188-141b, обеспечивающих заданные требования по вероятностно-временным характеристикам // Доклады 22-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» Рос. науч.-техн. общ. радиотехн. и связи им. А.С. Попова. – М.: ООО «БРИС-М». – С. 51-57.
5. Склляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2003. – 1104 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – 2005. – 576 с.
7. Стратегия развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014-2020 годы и на перспективу до 2025 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 1 ноября 2013 г. №2036-р.
8. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ от 5 декабря 2016 г. №646.
9. Попов М.Ю., Калач П.К., Деркач А.М. Анализ протокола управления трафиком стандарта MIL-STD-188-141B // Доклады 2-ой Всероссийской конференции «Современные технологии обработки сигналов» (СТОС-2019); Серия: научные Всероссийские, конференции / Рос. науч.-техн. общ. радиотехн., электрон. и связи им. А.С. Попова. – М. : ООО «БРИС-М», 2019. – Вып. 2. – С. 45-49. – ISBN 978-5-905278-39-6.
10. Цимбал В.А., Попов М.Ю., Кабанович С.Г., Калач П.К., Токарев Д.А. Методика определения оптимального значения регулируемого параметра низкоскоростного протокола передачи данных стандарта MIL-STD-188-141B в двухточечном пакетном коротковолновом соединении // Техника радиосвязи. – 2019. – Вып. 3 (42). – С. 69-85. DOI 10.33286/2075-8693-2019-42-69-85.

Особенности применения интерфейсов в smart-теплицах

Демченко Виктория Валерьевна
Системы автоматизированного
контроля
Донской государственный
технический университет
Ростов-на-Дону, Россия
viktoria_d17.97@mail.ru

Обухов Павел Серафимович
Системы автоматизированного
контроля
Донской государственный
технический университет
Ростов-на-Дону, Россия
pobuhov@spark-mail.ru

Ивлиев Евгений Андреевич
Системы автоматизированного
контроля
Донской государственный
технический университет
Ростов-на-Дону, Россия
123ivliev123@mail.ru

Аннотация. Использование мониторинга управления в теплицах является перспективным направлением. Для этого теплица оснащают системами, состоящими из различных датчиков, которые передают информацию о переменных, определяющих микроклимат и о состоянии элементов и устройств. Поэтому целесообразно проводить анализ интерфейсов, применяемых в автоматических системах мониторинга и управления. В статье представлен обзор проводных интерфейсов, таких как CAN-шина, RS-232, шины RS-485, RS 422 и интерфейс «токовая петля». Также рассмотрены беспроводными технологиями, используемые в настоящее время для мониторинга теплиц такие как GSM, Wi-Fi, ZigBee и LORA.

Annotation. The use of management monitoring in greenhouses is a promising direction. To do this, the greenhouse is equipped with systems consisting of various sensors that control the elements and devices. Therefore, it is advisable to analyze the interfaces used in automatic monitoring and control systems. This article provides an overview of wired interfaces, such as the CAN bus, RS-232, RS-485, RS-422, and the current loop interface. Wireless technologies currently used for greenhouse monitoring, such as GSM, Wi-Fi, ZigBee, and LORA, are considered.

Ключевые слова: SMART-теплица, проводные интерфейсы, беспроводные интерфейсы, микроклимат, энергоэффективность.

Keywords: SMART-greenhouse, wire interfaces, wireless interfaces, microclimate, energy efficiency.

I. ВВЕДЕНИЕ

Климатические условия существенно влияют на количество урожая. В случае такой культуры как томаты, наиболее значимыми переменными являются температура воздуха, влажность воздуха, направление ветра, солнечное излучение и влажность почвы. Их неадекватные значения могут вызвать заболевания и вредителей, а также уменьшить количество урожая. Теплицы используются для минимизации влияния неблагоприятных факторов, ограничивающих производство и качество сельскохозяйственных культур. Они могут поддерживать переменные, определяющие микроклимат, и эффективно использовать воду, тем самым добиваясь лучшей оптимизации в сельскохозяйственном производстве. Хотя не все географические районы отвечают условиям, необходимым для выращивания томата, существует по-

требность в технической помощи для обеспечения жизнеспособных условий для него. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки внедрили системы управления для сельскохозяйственных теплиц, которые поддерживают климат в помещениях под контролем для наилучшего роста культур [1, 2]. Сельскохозяйственные культуры, выращиваемые в теплицах, могут подвергаться воздействию неблагоприятных экологических условий, такие как высокая солнечная радиация, высокая температура воздуха, низкая относительная влажность воздуха в течение дня, высокая относительная влажность воздуха на рассвете и сумерках, плохая вентиляция. Данные условия обычно возникает в связи с аспектами, связанными с временными днями, климатом географического района или типом тепличного материала. Поэтому необходимо включить высокоточные системы мониторинга окружающей среды как внутри, так и снаружи теплиц, чтобы избежать возникновения вышеупомянутых неблагоприятных климатических условий. Внедрение этих систем позволит минимизировать экономические потери производителя из-за ухудшения состояния или гибели растений [3]. В последние годы сельскохозяйственный сектор получает выгоды от использования сетей мониторинга, которые используются для повышения эффективности производства.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На сегодняшний день сети мониторинга в теплицах могут быть реализованы с помощью проводных или беспроводных технологий. В проводных сетях взаимодействие между узлами на физическом уровне осуществляется с помощью проводов, которые соединяют компьютеры и другие устройства, образующие сети, в то время как в беспроводных сетях устройства соединяются между собой с помощью технологий распространения радиоволн, без необходимости использования структурированной кабельной среды. Обе технологии имеют сильные и слабые стороны, и их использование зависит от типа приложения. Из обзора научной литературы можно найти не так много исследований о внедрении сетей мониторинга для теплиц, и иногда они используют технологии проводной связи, такие как CAN-шина, RS-232, шины RS-485, RS 422 и интерфейс «токовая петля».

CAN. CAN (Control Area Network) – последовательная магистраль, обеспечивающая связь в сеть "интеллектуальных" устройств ввода/вывода, датчиков и исполнительных устройств некоторого механизма или даже предприятия. Характеризуется протоколом, обеспечивающим возможность нахождения на магистрали нескольких ведущих устройств, передачу данных в реальном времени и коррекцию ошибок, обладающим высокой помехоустойчивостью. Предназначен для организации высоконадежных недорогих каналов связи в распределенных системах управления. Интерфейс широко применяется в промышленности, энергетике и на транспорте. Позволяет строить как дешевые мультиплексные каналы, так и высокоскоростные сети. Система арбитража протокола CAN исключает потерю информации и времени при "столкновениях" на шине.

RS-232. RS-232 – это интерфейс передачи информации между двумя устройствами на расстояние до 15 м. Используется для подключения к вычислительным машинам самого разного оборудования, нетребовательного к скорости обмена. Интерфейс активно используется в промышленности для подключения периферии и устройств, расположенных достаточно далеко от компьютера, и даже работающих в сложных условиях внешней среды. Также этот стандарт используется для взаимодействия микроконтроллеров различных архитектур, имеющих интерфейс UART, с другими цифровыми устройствами периферии.

RS-485, RS-422. Интерфейсы RS-485 и RS-422 описаны в стандартах ANSI EIA/TIA-485-A и EIA/TIA-422. Интерфейс RS-485 является наиболее распространенным в промышленной автоматизации. Основные его достоинства: двусторонний обмен данными всего по одной витой паре проводов; работа с несколькими трансиверами, подключенными к одной и той же линии, т. е. возможность организации сети; большая длина линии связи; достаточно высокая скорость передачи.

«Токовая петля». Интерфейс «токовая петля» (Current Loop) специфицирован в стандартах IEC 62056-21 / DIN 66258 и используется для передачи информации с 1950-х годов. Первоначально в нем использовался ток 60 мА; позже, с 1962 года, получил распространение интерфейс с током 20 мА, преимущественно в телетайпных аппаратах. В 1980-х годах начала широко применяться «токовая петля» 4-20 мА в разнообразном технологическом оборудовании, датчиках и исполнительных устройствах средств автоматики. Популярность "токовой петли" начала падать после появления стандарта на интерфейс RS-485 (1983 г.). В передатчике "токовой петли" используется не источник напряжения, как в интерфейсе RS-485, а источник тока. Основным недостатком «токовой петли» является ее принципиально низкое быстродействие, которое ограничивается скоростью заряда емкости кабеля от источника тока.

Сравнительные характеристики выше рассмотренных интерфейсов представлены в табл. 1.

Положительными аспектами проводных сетей являются большая пропускная способность, максимально возможная производительность и более высокая скорость передачи, в то время как отрицательными аспектами являются сложная структура проводки, фиксиро-

ванная топология сети, высокая стоимость установки и обслуживания, высокое энергопотребление и ограничения на увеличение узлов.

ТАБЛИЦА 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОДНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Параметр	CAN
Способ передачи сигнала	Дифференциальный
Максимальное количество приемников	64
Максимальная длина кабеля	1000 м
Максимальная скорость передачи	1 Мбит/с
Параметр	RS-232
Способ передачи сигнала	Однофазный
Максимальное количество приемников	1
Максимальная длина кабеля	15 м
Максимальная скорость передачи	460 кбит/с
Параметр	RS-422
Способ передачи сигнала	Дифференциальный
Максимальное количество приемников	10
Максимальная длина кабеля	1200 м
Максимальная скорость передачи	10 Мбит/с
Параметр	RS-485
Способ передачи сигнала	Дифференциальный
Максимальное количество приемников	32
Максимальная длина кабеля	1200 м
Максимальная скорость передачи	30 Мбит/с

ZigBee. Беспроводной протокол ZigBee считается одной из лучших технологий-кандидатов для сельского хозяйства и фермерства. Учитывая его низкий рабочий цикл, ZigBee считается подходящим для систем, таких как контроль за орошением [4], управление качеством воды и контроль удобрений и пестицидов, все из которых требуют циклического обновления информации. На основе этой технологии сенсорные узлы в сельскохозяйственном поле могут взаимодействовать с маршрутизатором или координационным узлом на большом расстоянии (т.е. 100 м) при использовании серии XBee 2. Количество развернутых узлов датчиков и маршрутизаторов будет увеличено, чтобы охватить всю зону наблюдения на местах.

Bluetooth (BT). Стандарт BT был использован для установления линии связи между подвижными и портативными устройствами, такими как ноутбуки, на небольшом расстоянии до 10 м. Учитывая его повсеместный характер и доступность в большинстве мобильных устройств, BT был использован для удовлетворения многоуровневых сельскохозяйственных требований. Учитывая низкое энергопотребление, широкую доступность и простоту использования для фермеров, BT на основе смартфонов используется в различных сельскохозяйственных приложениях, таких как управление ирригационными системами, мониторинг почвы и погодных условий, а также контроль использования удобрений и пестицидов.

WiFi. Wi-Fi в настоящее время является наиболее широко используемой беспроводной технологией, доступной в портативных устройствах, включая планшеты, смартфоны, ноутбуки и настольные компьютеры. Wi-Fi

имеет подходящее расстояние связи около 20 м и 100 м в помещении и на открытом воздухе соответственно. Во многих работах [5, 6, 7] описаны системы для мониторинга тепличных параметров на основе основе Wi-Fi (IEEE 802.11 g). Предлагаемые системы состоят из трех узлов: датчика, маршрутизатора и сервера. Контролируются климатические условия теплицы или сельскохозяйственного поля, такие как влажность, температура, давление воздуха, освещенность, уровень воды и влажность почвы. Применение беспроводного интерфейса Wi-Fi направлено на снижение затрат, минимизацию электрических соединений и повышение мобильности и гибкости точек зондирования. Однако энергопотребление систем на основе Wi-Fi чрезвычайно велико-42,17 Дж/ч. Учитывая, что Wi-Fi требует большой мощности и длительного времени связи технология Wi-Fi не является предпочтительной для сельскохозяйственных приложений, несмотря на то, что сервер Wi-Fi предотвращает потери данных, применяя методы избыточности данных. Кроме того, Wi-Fi не может использоваться для многоуровневых приложений и зависит от количества пользователей и интенсивности сигнала; таким образом, он не подходит для использования беспроводной сети датчиков в сельском хозяйстве. Кроме того, узлы Wi-Fi все время прослушивают, поэтому потребление энергии увеличивается.

GPRS/3G/4G. GPRS-это служба пакетной передачи данных для сотовых телефонов на базе GSM. GPRS часто испытывает переменные задержки и пропускную способность, и такая технология зависит от количества потребителей, которые используют одни и те же каналы связи и ресурсы. Авторы статьи [8] использовали модуль GPRS и беспроводная сеть датчиков для разработки автоматической системы орошения сельскохозяйственных культур на основе информации,

собранный датчиками температуры и влажности почвы, установленными в корневой зоне растений, и сочли эту систему экономически эффективным и практичным решением.

Long Range Radio (LoRa). LoRa представлена компанией LoRa Alliance в качестве стека протоколов для маломощных и широкополосных коммуникационных технологий Интернета вещей (IoT), которые связаны с передачей внутри помещений. Базовая сетевая архитектура LoRaWAN состоит из конечных устройств LoRa, шлюзов LoRa и сетевого сервера LoRa. Конечное устройство LoRa взаимодействует со шлюзами, которые используют LoRa с LoRaWAN. Шлюзы LoRa передают необработанные пакеты LoRaWAN с конечных устройств на сетевой сервер LoRa с высокой пропускной способностью на основе интерфейса обратной передачи, который обычно является 3G или Ethernet. Соответственно, шлюзы LoRa действуют как двунаправленный адаптер связи или протокола с сетевым сервером LoRa. В этом случае сетевой сервер LoRa отвечает за декодирование пакетов данных, передаваемых устройствами LoRa, и создание кадров, которые будут направлены обратно на устройства. LoRa предлагает двунаправленное решение, которое соответствует технологиям Wi-Fi или сотовой связи от машины к машине (M2M). LoRa представляет экономически эффективный метод подключения мобильных устройств к сети или конечным устройствам.

Недавно LoRa был использован в нескольких исследовательских проектах в области сельского хозяйства, разработанных компанией Libelium, таких как улучшение производства киви на основе интеллектуальной системы орошения, мониторинг зеленых зон с использованием системы интеллектуального сада, улучшение методов удобрения урожайности кукурузы, повышение урожайности бананов, увеличение посевов табака за счет контроля климатических условий, экономия воды с помощью интеллектуальной системы орошения, мониторинг посевов виноградников, и мониторинг заболеваний, поражающих виноградники.

SigFox. SigFox- это сверхширокополосная беспроводная сотовая сеть с низкой скоростью передачи данных, что делает эту технологию подходящей для IoT и систем связи машинного типа.

III. СРАВНЕНИЕ ПРОТОКОЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

В табл. 2 представлены характеристики рассматриваемых протоколов или технологий беспроводной связи такие как: энергопотребление, дальность связи, скорость передачи данных, стоимость, сложность системы и другие параметры. Проблемы в области применения в сельском хозяйстве могут быть решены на основе выбора диапазона развертывания. Например, передаваемый узлом датчика сигнал ослабляется, когда поле сельского хозяйства разделено препятствиями. Энергопотребление рассматривается как еще одно ограничение в конструкции беспроводных датчиковых сетей в тепличных системах. Беспроводной протокол ZigBee был разработан для работы с подходящим диапазоном связи и низким энергопотреблением. Считается, что LoRa и SigFox работают с низким энергопотреблением и большим радиусом действия. Соответственно, энергопотребление и дальность связи вышеуказанных технологий были оценены следующим образом.

Zigbee и Bluetooth low energy (BLE) предназначены для устройств с батарейным питанием. Эти технологии экономят электроэнергию за счет циклического использования при низких нагрузках и переходят в спящий режим, чтобы продлить срок службы батареи. Классические BT, WiFi, GPRS, LoRa и SigFox имеют более высокое энергопотребление, чем ZigBee. Хотя ZigBee имеет более короткий диапазон связи, чем LoRa, SigFox и GPRS, этот диапазон может быть расширен с помощью узла маршрутизатора, чтобы преодолеть ограничения развертывания узла в сельскохозяйственных системах. BLE превосходит ZigBee по энергопотреблению, но этот беспроводной протокол ограничен в сельскохозяйственных системах из-за его короткого расстояния связи 10 м. ZigBee также обладает более высокой эластичностью сети, чем BT, что позволяет использовать различные топологии. Учитывая выше сказанное применение технологии ZigBee в сельском хозяйстве является предпочтительным из-за его энергоэффективного, надежного и недорогого беспроводного протокола.

Беспроводной протокол LoRa охватывает большую зону связи с низким энергопотреблением. Поэтому он может быть надлежащим образом развернут на обшир-

ных сельскохозяйственных полях. Однако, шлюзы LoRa имеют ограниченную пропускную способность менее 100 сообщений в минуту. Кроме того, технология LoRa сложна и имеет значительные аппаратные реализации [9].

SigFox имеет чрезвычайно низкую скорость передачи данных (100 бит / с) и медленное время передачи (10 с на 10 байт) по сравнению с ZigBee иLoRa [10]. SigFox поддерживает звездную топологию, контролируемую централизованным сервером, который управляет связью между устройствами и базовыми станциями, в то время как LoRa поддерживает глобальную сеть, основанную на топологии "звезда-звезда", создавая мост из шлюзов LoRa. Учитывая, что скорость передачи данных и время передачи являются критическими проблемами в любой системе связи, SigFox не может широко использоваться в сельском хозяйстве. Кроме того, SigFox обладает ограниченной надежностью из-за односторонней связи (без сигнала подтверждения) и низкой мощности приема. Однако инфраструктуры LoRa и SigFox все еще находятся в стадии разработки.

ТАБЛИЦА 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСПРОВОДНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Параметры	ZigBee	BT	BLE	WiFi
Стандарт	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11a,b,g,n
Диапазон частот	868/915 МГц и 2.4 ГГц	2.4 ГГц	2.4 ГГц	2.4 ГГц
Тип модуляции	BPSK/OQPSK	GFSK,DPSK,DQPSK	GMSK	BPSK/OQPSK
Количество RF каналов	1, 10, 16	79	40	11
Пропускная способность	2 МГц	1 МГц	1 МГц	22 МГц
Потребляемая мощность	36.9 мВт	215 мВт	10 мВт	835 мВт
Скорость передачи данных	250 Кб/с	3 Мб/с	1 Мб/с	150 Мб/с
Задержка	20-30 мс	100 мс	6 мс	50 мс
Дальность связи	100 м	10-50 м	10 м	100 м
Размер сети	65000	8		32
Стоимость	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая
Параметры	GPRS	LoRa	SigFox	
Стандарт		IEEE 802.15.4g	IEEE 802.15.4g	
Диапазон частот	900-1800 МГц	869.915 МГц	868.915 МГц	
Тип модуляции	GMSK/OQPSK	GFSK	DBPSK(UL), GFSK(DL)	
Количество RF каналов	124	10	360	
Пропускная способность	200 КГц	<500 КГц	<100 КГц	
Потребляемая мощность	560 мВт	100 мВт	122 мВт	
Скорость передачи данных	170 Кб/с	50 Кб/с	100 б/с	
Задержка	<1 с			
Дальность связи	1-10 км	5 км	10 км	
Размер сети	1000	10000	1000000	
Стоимость	Средняя	Низкая	Низкая	

IV. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМ СИСТЕМЫ SMART-ТЕПЛИЦЫ

Работа SMART-теплицы регулируется устройством управления, Raspberry Pi – это миниатюрный одноплатный компьютер.

Блок ввода/вывода (БВВ) предназначен для ввода и обработки входных аналоговых и дискретных сигналов и формирования выходных аналоговых и дискретных сигналов.

Непосредственно с устройства управления SMART-теплицы производится передача информации на устройство чтения аналоговых входов и чтения температурных датчиков (влажности почвы) и устройство управления передвижным освещением. Это необходимо для создания и поддержания благоприятных условий в теплице, а также быстрого реагирования на любые отклонения.

Мониторинг и отслеживание за состоянием теплицы и растений производится путем сбора информации персональным компьютером (Raspberry Pi) и ее передачей через Internet фермеру на какой-либо электронный гаджет, что позволяет дистанционно управлять процессами в SMART-теплице.

Структурная схема изображена на рис. 1.

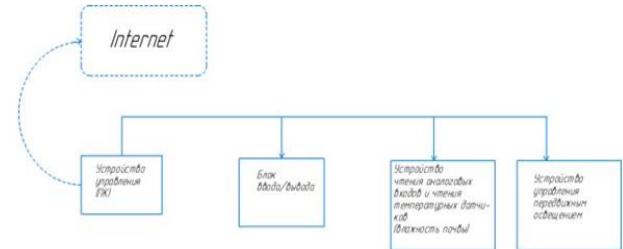


Рис. 1. Схема электрическая структурная

Блок управления SMART-теплицей должен состоять из ПК.

Для разработки блока передвижного освещения целесообразно использовать микроконтроллер и энкодер.

Блок ввода/вывода будет состоять из микроконтроллеров, а также требуется использовать устройства чтения аналоговых входов и чтения температурных датчиков (влажности почвы) и устройство управления передвижным освещением.

Схема электрическая функциональная представлена на рис. 2.

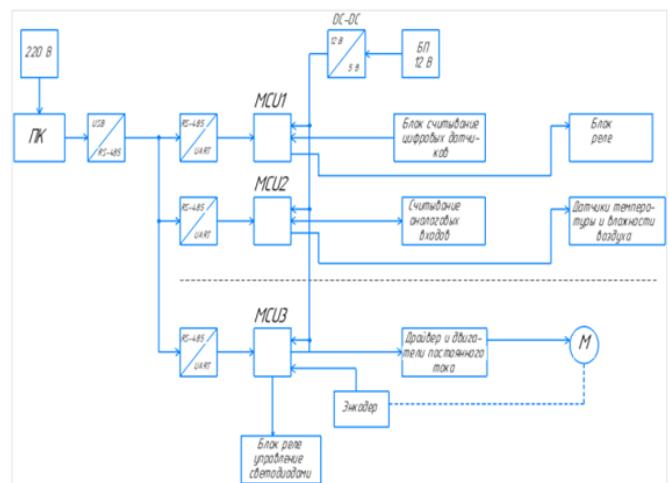


Рис. 2. Схема электрическая функциональная

Для того чтобы микроконтроллеры могли принимать и передавать данные стоят преобразователи с RS-485 на UART.

Из данной функциональной схемы можем видеть следующее: блок считывания цифровых данных считывает информацию с микроконтроллера MCU1, который в свою очередь управляет блоком реле. Стабилизатор с 12В на 5В питает каждый микроконтроллер по шине питания. MCU2 производит считывание аналоговых входов и управляет датчиками температуры и влажности воздуха.

Для оценки положения системы передвижного освещения в блоке передвижного освещения целесообразно использовать микроконтроллер MCU3 иэнкодер.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы были рассмотрены проводные и беспроводные интерфейсы, их характеристики и возможность применения в системах автоматического контроля и управления. Было выяснено что проводные сети обладают большой пропускной способностью, имеют более высокую скорость передачи, однако имеют сложную структуру проводки, фиксированную топологию сети, высокую стоимость установки и обслуживания, высокое энергопотребление и ограничения на увеличение узлов.

Также было проведено сравнение различных беспроводных технологий или протоколов, таких как Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, GPRS/3G/4G, LoRa и SigFox. Результаты сравнения показали, что беспроводные протоколы ZigBee и LoRa более удобны для сельскохозяйственных приложений, чем другие, из-за их низкого энергопотребления и подходящего диапазона связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hemraj S. Power estimation and automation of green house using wireless sensor network. In Proceedings of the 5th International Conference on Confluence the Next Generation Information Technology Summit (Confluence), Noida, India, 25–26 September. – 2014. – P. 436-441.
2. Roldán J.J. et al. Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses // Sensors. – 2015. – Vol. 15. – P. 3334–3350.
3. Srbinovska M. et al. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks // Journal of cleaner production. – 2015. – Vol. 88. – P. 297-307.
4. Cancela J. et al. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for Vitis vinifera // Agric. Water Manag. – 2015. – Vol. 151. – P. 52-63.
5. Chung S.-O. et al. The potential of remote monitoring and control of protected crop production environment using mobile phone under 3G and Wi-Fi communication conditions // Eng. Agric. Environ. Food. – 2015. – Vol. 8. – P. 251-256.
6. Mohapatra A.G., Lenka S.K. Neural network pattern classification and weather dependent fuzzy logic model for irrigation control in WSN based precision agriculture // Procedia Comput. Sci. – 2016. – Vol. 78. – P. 499-506.
7. Mendez G.R., Mukhopadhyay S.C. A Wi-Fi based smart wireless sensor network for an agricultural environment// Wireless Sensor Networks and Ecological Monitoring. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. – 2013. – P. 247-268.
8. Gutiérrez J. Automated irrigation system using a wireless sensor network and gprs module // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2014. – Vol. 63. – P. 166-176.
9. Kirichek R., Kulik V. Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN) by Using Lpwan Protocols // In Proceedings of the International Conference on Distributed Computer and Communication Networks. Moscow. Russia. 21–25 November. – 2016. – P. 442-453.
10. Ali A. et al. Technologies and challenges in developing machine-to-machine applications // J. Netw. Comput. Appl. – 2017. – Vol. 83. – P. 124–139.

Проблемы обеспечения надежности беспроводных сетей датчиков

Алалван Амин Раад Джихад

Институт прикладных информационных технологий, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. Саратов, Россия ameenraad2@gmail.com

Львов Петр Алексеевич

Отдел схемотехники и программирования, Энгельсское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева Энгельс, Россия peter.lvov@gmail.com

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 прикладных информационных технологий, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. Саратов, Россия alvova@mail.ru

Мищенко Дмитрий Алексеевич

Институт электронной техники и приборостроения Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. Саратов, Россия mishchenkoda@sstu.ru

Никифоров Александр Анатольевич

Институт электронной техники и приборостроения Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. Саратов, Россия ieei_director@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено решение задач восстановления работоспособности беспроводных сетей датчиков (БСД) после возможных сбоев некоторых мотов и потери пакетов. Были исследованы основные виды БСД и традиционно используемые топологии таких сетей. Рассмотрена проблема обеспечения надежности БСД и дан обзор основных методов ее повышения. Подробно исследованы протоколы обмена данными между узлами на трех уровнях: транспортном, сетевом и канале передачи данных.

Annotation. The solution of the problems of restoring the WSN operability after possible failures of some bots and packet loss is considered. The main types of WSNs and traditionally used topologies of such networks are investigated. The problem of ensuring the reliability of WSNs is considered and an overview of the main methods of its improvement is given. The protocols of data exchange between nodes at three levels: transport, network, and data transmission channel are studied in detail.

Ключевые слова: беспроводная сеть датчиков, протокол, конфигурация сети, архитектура сети, мот, канал передачи данных, маршрутизация.

Keywords: wireless sensor network, protocol, network configuration, network architecture, mot, data transmission channel, routing.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие беспроводная связь [1, 2] стала преимущественной технологией организации мобильных информационных систем и сетей различного функционального назначения. Беспроводные мобильные сети [3], прежде всего, MANET (Mobile Ad hoc Network) – беспроводные децентрализованные и самоорганизующиеся сети, способные устанавливать случайным образом соединения между произвольными узлами, в большинстве случаев заменяют собой традиционные сетевые

структуры. Широкое распространение получили также и технологии Wi-Fi [4]. Помимо таких беспроводных технологий все активнее внедряются в повседневную практику беспроводные сети датчиков (БСД – Wireless Sensor Networks, WSN) [5–7], реализующие наилучшим образом мониторинг распределенных объектов. Гибкость, эффективность, относительная дешевизна и возможность быстрого развертывания БСД обеспечивают создание на их базе систем интеграции многочисленных вариантов необслуживаемых узлов. Это позволяет использовать новые классы приложений и услуг автономного контроля различных объектов и процессов, в том числе в опасных для людей или недоступных средах. Обладая хорошим потенциалом получения большого количества разнообразных данных о среде, в которой они развернуты, БСД обеспечивают качественную передачу этой важной информации по сети конечным пользователям.

Естественной архитектурой таких совместных распределенных датчиков является многоузловая сеть с беспроводными каналами связи (БПКС), чаще всего с радиоканалами связи (РКС), работающими в условиях неконтролируемых изменений их состояний, в первую очередь, из-за влияния внешней среды. Кроме того, в процессе функционирования сети изменяются и внутренние параметры БПКС. В общем случае можно говорить, что передача информации в БСД происходит по БПКС с помехами, что приводит к возникновению ошибок передачи. При этом наиболее критичным является возможная потеря пакетов. Помимо этого, из-за малой дальности действия устройств связи датчиков данные часто приходится передавать по РКС последовательно от узла к узлу по принципу радиоретрансляции, что обуславливает дополнительные причины возможных потерь пакетов данных из-за некорректной работы узлов.

Кроме того, причинами потери информационных пакетов могут быть случайные сбои в работе того или иного узла, приводящие к произвольному отключению соответствующего датчика. Такие сбои возможны не только как результат ненадежности (отказов) программно-аппаратных средств конкретных узлов, но и как следствие неравномерного распределения потребляемой ими энергии в условиях жестких требований по энергетике. Эти поврежденные узлы часто образуют общую поврежденную область, которая ограничивает возможности сети, препятствует ее нормальной работе, приводя к потере пакетов. Наиболее опасно это в конвергентных сетях, в частности при концентрации трафика данных в БСД на узлах датчиков, окружающих узел сбора информации (УСИ – Sink Nodes). Именно в узлах вблизи конечного приемника чаще всего возникают проблемы с энергопитанием, что приводит к частичной, а иногда и к полной изоляции приемника и вследствие этого – к снижению надежности сети в целом.

Другими словами, основной негативной характеристикой многоузловой БСД является достаточно высокая вероятность потери информационных пакетов, поэтому для повышения надежности БСД необходимо обеспечивать возможность восстановления работоспособности узлов и сети в целом. Обеспечение надежности сети особенно важно в чрезвычайных ситуациях, когда надежная доставка данных, по сути, является важнейшим фактором успеха парирования таких ситуаций и их последствий. Для повышения информационной надежности БСД в этих случаях необходимо использовать максимально возможное число датчиков, объединенных в сеть для решения конкретной общей задачи. При этом наилучшим режимом работы сети является адаптивная маршрутизация пакетов, которая позволяет реализовать их надежную доставку даже в случае повреждения некоторых узлов и каналов маршрутизации за счет организации надлежащего мониторинга и планирования процесса маршрутизации.

II. ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕШАЕМЫЕ ПРОБЛЕМЫ

При разработке БСД основной целью является создание программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего надежный процесс получения и беспрерывной передачи данных по сетевым БПКС в условиях многочисленных неконтролируемых мешающих факторов.

Для достижения этой цели принципиально важными являются следующие задачи, требующие специальных решений.

1) Разработка (выбор, если возможно) надежного протокола передачи данных, удовлетворяющего требованиям (включая ограничения) к БСД, что требует исследования влияния основных негативных факторов на функционирование сети с последующим определением методов и средств, минимизирующих (или исключающих) последствия мешающих воздействий, с оценкой обеспечиваемой надежности и экономической целесообразности.

2) Разработка протоколов восстановления работоспособности сети после случайных сбоев в узлах для обеспечения доступности передачи данных и продления срока службы сети, но с обязательным учетом соответ-

ствующих ограничений БСД по потреблению энергии. Последнее особенно важно при разработке протоколов восстановления, использующих для повышения коэффициента доставки пакетов (отношения числа принятых пакетов к общему числу переданных пакетов) методы дублирования передачи, в частности повторной передачи по запросу, что требует дополнительных сетевых ресурсов, в том числе энергетических. В этом контексте критерии разработки протоколов восстановления должны учитывать компромисс между степенью повышения надежности и соответствующим ресурсным обеспечением.

3) Подробная и всесторонняя оценка разработанных протоколов и предложенных решений (задачи 1 и 2) на базе моделей БСД и исследование рабочих параметров и характеристики сети в целом и составляющих ее отдельных элементов. При этом моделирование должно проводиться с максимально возможным учетом условий функционирования сети (моделирование канальных помех, адаптивная маршрутизация, ограниченный энергетический ресурс и др.).

III. БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ДАТЧИКОВ И МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ

За последнее десятилетие БСД привлекли огромное внимание научных коллективов и промышленных предприятий в связи с беспрецедентными перспективами создания «умных» систем (Smart Systems), практически не требующих управленаческого участия человека [5–8]. Они охватывают широчайшую область применения – от здравоохранения и мониторинга окружающей среды до сельского хозяйства и пищевой промышленности [9, 10].

A. Обзор БСД

БСД состоят из набора небольших недорогих устройств, называемых узлами сети датчиков (рис. 1). Малые размеры и вес, низкая стоимость оборудования и простота развертывания таких устройств позволяют снимать информацию об окружающих объектах с наименьшей степенью собственного воздействия на них. Благодаря распределению в пространстве десятков или даже сотен таких автономных устройств можно создать БСД для совместного мониторинга параметров окружающих объектов непосредственно в реальных местах их размещения.

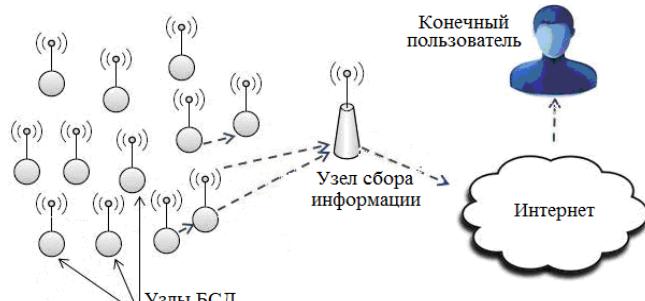


Рис. 1. Типовая структура БСД

После развертывания датчики передают снятые ими данные на один или несколько выделенных узлов – УСИ. В зависимости от используемой топологии эти данные могут быть доставлены к УСИ непосредственно

от узла-отправителя (за один шаг – Single Hop) или через промежуточные узлы (за несколько шагов – Multi-Hop), используя БПКС. Полученные приемником УСИ данные могут быть обработаны и проанализированы, что позволяет конечному пользователю предпринять соответствующие действия. Некоторые сети имеют в своем составе специальные объекты, называемые исполнительными механизмами или приводами, выполняющими определенные манипуляции, которые могут быть и мобильными (роботизированные системы). В таких случаях эти сети называются исполнительными БСД (Wireless Sensor and Actuator Networks, WSAN) [11].

B. Топология беспроводных сетей датчиков

Существуют различные топологии развертывания БСД. Рассмотрим три варианта топологии БСД, наиболее часто встречающиеся в различных приложениях.

1) *Топология звезды* (рис. 2,б). Используется в основном в БСД с малым числом узлов. Сеть состоит из центрального узла, к которому подключены все остальные узлы. Центральный узел представляет собой УСИ, который обеспечивает общую точку соединения для всех других узлов и координирует маршруты пакетов обмена информацией. Таким образом, центральный узел является узлом приемника, а все узлы в сети находятся в пределах радиовидимости базовой станции. Узлы напрямую передают собранные данные в приемник без необходимости использования других узлов в качестве ретрансляторов.

2) *Топология дерева* (рис. 2,в). Это иерархическая структура, корнем которой является УСИ. Некоторые узлы ветвей (узлы, которые имеют дочерние узлы) обозначаются как головные узлы кластеров. Обычно такие узлы находятся на один уровень ниже корня (они напрямую связаны с УСИ). Конечные узлы (которые не имеют дочерних узлов) связываются с базовой станцией через свой головной узел кластера. Древовидные сети особенно полезны, когда область мониторинга состоит из нескольких разрозненных районов. Их главным преимуществом является возможность варьирования размеров кластеров и всей БСД.

3) *Ячеистая топология* (рис. 2,г). Ячеистые сети являются специальной топологией больших БСД. В таких сетях узлы, существенно удаленные от приемника (вне пределов его диапазона радиовидимости), передают информацию последовательно через промежуточные узлы (в несколько этапов), по направлению к УСИ по принципу радиоретрансляции. При этом каждый узел выполняет две основные функции: сбор данных и организацию взаимодействия с соседями для передачи данных, исходящих из других узлов. Таким образом, отсутствует иерархия узлов, как в древовидной топологии, и все узлы сети датчиков идентичны с точки зрения их функциональности. Подобная БСД, по сути, представляет собой MANET, в которой не только адаптивно решаются проблемы организации и маршрутизации трафика, но и осуществляется балансировка трафика с точки зрения энергосбережения. Следует заметить, что взаимодействие каждой пары узлов (независимо от то-

пологии) осуществляется по принципу двухточечной связи типа «точка–точка» (рис. 2,а). В качестве отдельного вида топологии такая структура в БСД не рассматривается из-за крайне низкой функциональности. БСД состоят из набора небольших недорогих устройств, называемых узлами сети датчиков (рис. 1). Малые размеры и вес, низкая стоимость оборудования и простота развертывания таких устройств позволяют снимать информацию об окружающих объектах с наименьшей степенью собственного воздействия на них. Благодаря распределению в пространстве десятков или даже сотен таких автономных устройств можно создать БСД для совместного мониторинга параметров окружающих объектов непосредственно в реальных местах их размещения.

IV. НАДЕЖНОСТЬ БСД

Как было сказано выше, главным требованием к БСД является их надежность. В первую очередь, имеется в виду информационная надежность в условиях действия помех в БПКС [12]. БСД должна самостоятельно обеспечивать адаптивную помехоустойчивость, реализуя эффективные механизмы реализации бесперебойного распространения информации, особенно в многоэтапном сценарии при режимах радиоретрансляции. Архитектура БСД должна удовлетворять условиям обеспечения надежной передачи и доставки пакетов при ограничениях возможностей обработки данных, энергетических ресурсов батарей питания и ненадежных БПКС [13], в которых наряду с разнообразными по характеристикам шумами и случайными помехами возникают конфликты доступа, многолучевое замирание [14], затенение сигнала и т.д. Эти факторы не должны приводить к потере пакетов во время передачи информационных сигналов.

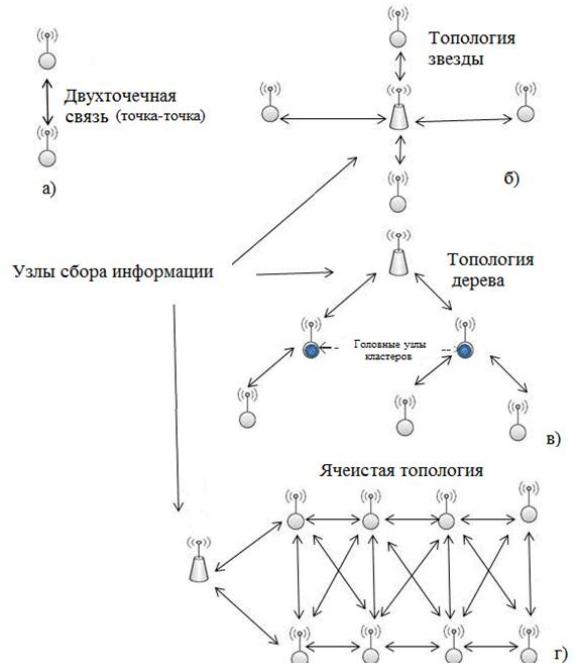


Рис. 2. Виды топологий БСД

Более того, для успешной работы любого приложения (особенно критически важного, например, при передаче данных об угрозе жизни населению или сигналов

тревоги) требуется доставка высокоприоритетных пакетов к УСИ без каких-либо потерь на маршруте от узла источника [15].

A. Обзор методов обеспечения надежности БСД

Здесь представлены классические методы обеспечения надежности передачи данных [12] в БСД при их восстановлении после потери пакетов.

Основным средством повышения надежности БСД является метод автоматического запроса на повторную передачу (АЗПП, Automatic Repeat Request). Как правило, он реализуется на основе двух способов восстановления: 1) обмен с ближайшим узлом-отправителем (Нор-by-Hop Retransmission) и 2) сквозная повторная передача (End-to-End Retransmission). На рис. 3 показаны различия между этими механизмами передачи подтверждений об успешном приеме пакета или его пропаже. В первом случае подтверждение об отсутствии приема пакета передается ближайшему узлу, от которого пришло сообщение, во втором случае подтверждение об отсутствии приема пакета передается исходному узлу, из которого стартовал этот пропавший пакет.

Рассмотрим три основные технологии передачи сообщений для начала повторной передачи потерянного пакета при реализации АЗПП в БСД.

Явные подтверждения (Explicit Acknowledgments). При явных подтверждениях каждый успешный прием пакета данных напрямую подтверждается получателем с помощью короткого уведомления. Если отправитель не может распознать уведомляющее сообщение, то пакет через некоторое время ожидания автоматически передается повторно. Этот механизм гарантирует высокую надежность. Он используется протоколами, обеспечивающими надежность передачи пакетов для обоих способов восстановления на основе АЗПП (рис. 3).

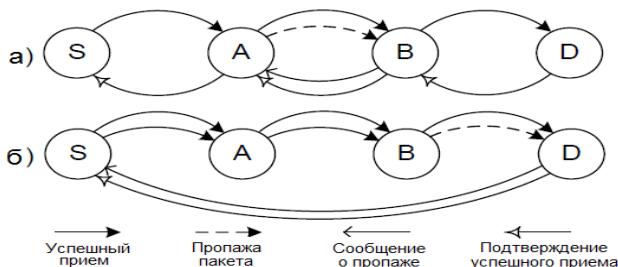


Рис. 3. Механизмы АЗПП: а) ближайшему узлу-отправителю (Hop-by-Hop); б) сквозной повторной передачи (End-to-End)

Отрицательные подтверждения (Negative Acknowledgments). Механизмы отрицательного подтверждения присваивают порядковые номера передаваемым пакетам для обнаружения их потери. На рис. 4,а показан пример отрицательного подтверждения. Узел В обнаруживает пропажу пакета с порядковым номером n уже после получения от узла А следующего пакета с номером $n+1$. Теперь В отправляет отрицательное подтверждение отправителю, чтобы указать потерю пакета n . В ситуациях, когда вероятность потери пакетов мала, этот механизм требует меньшего количества отдельных уведомлений, чем явные подтверждения. Отрицательные подтверждения также используются протоколами для обоих механизмов восстановления АЗПП (рис. 3).

Неявные подтверждения (Implicit Acknowledgment). Этот механизм не требует никаких дополнительных уведомлений. Но у неявных подтверждений есть определенные недостатки. Например, прослушивание результатов пересылки пакета требует дополнительной энергии (в примере для узла В), и этот механизм не работает, если D – последний узел маршрута (на последнем этапе пересылки). Поэтому эта технология используется только протоколами, обеспечивающими надежность связи с помощью механизма Нор-by-Нор.

В последнее время появились и другие методы обеспечения надежности БСД. Они подробно рассмотрены авторами в работах [45–48].

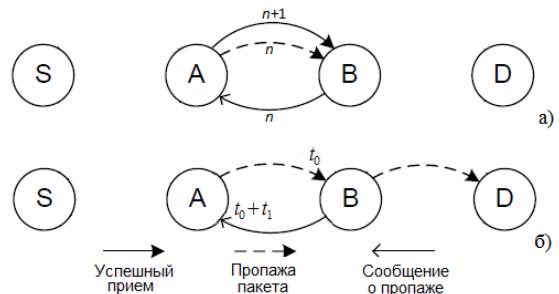


Рис. 4. Механизмы подтверждения: а) подтверждение о неудачной доставке пакета (Negative Acknowledgment); б) косвенное подтверждение (Implicit Acknowledgment)

V. СЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА БСД

БСД состоит из миниатюрных вычислительно-коммуникационных устройств — мотов (Motes) [16, 17]. Мот представляет собой плату обычно размером не более 15–20 см³. На плате размещаются процессор, память (флеш и оперативная), цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, радио-приемо-передатчик, источник питания и датчики. Набор применяемых датчиков зависит от функций, выполняемых БСД. Питание мота осуществляется от небольшой батареи; аккумуляторы обычно не используются, поскольку подзарядка в большинстве случаев невозможна. Моты служат для сбора, первичной обработки и передачи данных от датчиков.

Как правило, функциональные характеристики мотов в БСД по ограничениям возможностей обработки поступающего потока информации, связи с другими мотами и объему собственной памяти обуславливают специфические критерии, которым должны соответствовать протоколы маршрутизации и связи в БСД при их проектировании и работе в составе сети [17, 18]. Протоколы связи используются для управления всеми возникающими состояниями процесса передачи данных, от самого низкого уровня доступа к физической среде к более высоким уровням, отвечающим за сквозную передачу пакетов и маршрутизации данных, и до самого верхнего уровня приложений, работающих с собранными данными и формирующими их пакеты. Помимо этого, с помощью протоколов производится контроль процесса передачи и запись возникших критических ситуаций. На рис. 5 представлена схема сетевой архитектуры в БСД.

Эта структура существенно отличается от типичных структур традиционных сетевых моделей из-за необходимости управления питанием на всех уровнях использу-

зумой архитектуры. Характерно, что из-за ограниченных возможностей мотов и специфического характера приложений БСД нельзя выделить четкие границы между уровнями используемой сетевой архитектуры, как в традиционных сетевых архитектурах. При этом в большинстве случаев фундаментальные протоколы связи БСД для запросов, маршрутизации и доставки данных интегрированы в методы распространения и агрегирования данных в БСД [19].

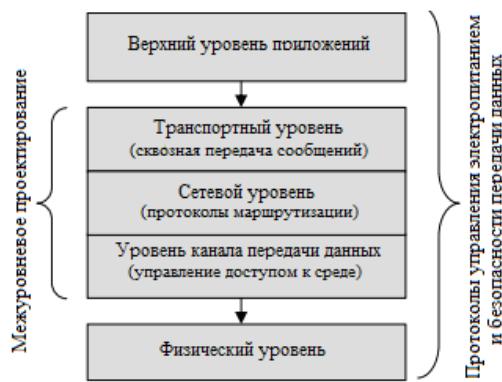


Рис. 5. Архитектура сети БСД

Эти ограничения стимулируют использование межуровневого подхода при разработке сетевых протоколов для БСД. В следующих разделах обсуждаются различные концепции функционирования и построения транспортных, сетевых и канальных уровней с точки зрения возможностей их применения в БСД.

A. Протоколы транспортного уровня

Протоколы транспортного уровня отвечают за сквозную передачу пакетов данных, устанавливают средства для надежной их доставки при централизованном или распределенном управлении в случаях перегрузки БПКС. Обязательным является требование тщательной проработки протоколов, поскольку в противном случае возможны нежелательные режимы коллапса БСД, БПКС которой ограничены по возможностям связи. Поэтому по мере развития приложений для БСД важно разрабатывать и реализовывать эффективные протоколы сетевой архитектуры для обеспечения надежности в сети с управлением данными.

В протоколы транспортного уровня для надежной доставки пакетов данных встраиваются специальные функции связи между соседними уровнями протокола (внутри одного узла связи), называемые примитивами (Primitives). Эти примитивы вызывают повторную передачу пакетов в случае их пропажи. Это реализуется использованием порядковых номеров пакетов, серий подтверждений доставки пакетов и интервалов времени ожидания или приема-передачи для доступа к потере пакетов, что позволяет отправителям и получателям учитывать полученные и/или пропущенные пакеты. Такие примитивы имеют решающее значение в приложениях БСД, так как, по сути, сами являются сетями с управлением данными.

Кроме того, протоколы транспортного уровня отвечают за контроль перегруженности. Это достигается путем установки примитивов, которые управляют скоростью передачи данных с целью исключения перегрузки

базовой сети и «узких» мест на базовой станции. В [20] классифицируются основные протоколы транспортного уровня, разработанные для БСД. Классификация некоторых протоколов транспортного уровня для БСД

B. Маршрутизация на сетевом уровне

Как и в беспроводной вычислительной сети (Wireless Computing), протоколы маршрутизации могут быть реактивными, проактивными, кооперативными или гибридными [19, 21]. Протоколы проактивной маршрутизации также известны как протоколы, управляемые таблицами, поскольку каждый узел постоянно поддерживает таблицу маршрутов для всех пунктов назначения. Реактивные протоколы – это протоколы маршрутизации по требованию, которые обнаруживают маршруты до места назначения только тогда, когда это требуется, например, когда ранее найденный маршрут устарел или стал недействительным. При использовании конкретного протокола приходится идти на определенные компромиссы, допуская задержку доставки данных, дополнительные накладные расходы на трафик протокола маршрутизации и удовлетворение требований к хранилищу протоколов. Задержка доставки данных мала в сетях, использующих проактивные протоколы маршрутизации, поскольку информация о пути всегда доступна. Тем не менее, в БСД возникают издержки, связанные с обнаружением и поддержанием путей ко всем пунктам назначения, даже к тем, которые могут использоваться крайне редко или вообще никогда не использоваться. Затраты трафика протокола маршрутизации сводятся к минимуму в реактивных сетях, когда имеются небольшой сетевой трафик и незначительные изменения топологии сети. Более того, требования к хранилищу проактивных протоколов маршрутизации возрастают пропорционально размеру сети. В протоколах совместной маршрутизации данные отправляются центральному объекту, который может проводить их дополнительную обработку и далее передавать информацию по назначению [21].

Протоколы маршрутизации также могут различаться по виду участвующих в них объектов связи. С этой точки зрения существуют маршрутизации, ориентированные на узлы и данные. В ориентированной на узлы маршрутизации данные маршрутизируются между узлами на основе адресов узлов. В ориентированной на данные маршрутизации используется адресация на основе атрибутов, когда узлы запрашивают какой-либо атрибут, а отвечают только те узлы, которые могут удовлетворить запрос, отвечая запрашиваемому атрибуту.

Для конкретных топологий БСД разработаны соответствующие протоколы маршрутизации, классифицируемые как плоские и иерархические топологии (рис. 6). Помимо этих топологий БСД, маршрутизация может быть по своей природе географической, когда пакеты направляются в моты, наиболее близкие к узлу назначения или УСИ. Протоколы маршрутизации БСД также могут основываться на различных критериях, определяемых конкретным приложением, или на атрибутах выполняемых операций [21]. Такие атрибуты операций могут учитывать многошаговую передачу сообщений, согласованность узлов БСД, тип запросов, параметры качества обслуживания (КО – Quality of Service, QoS), например, надежность, целостность данных, энергоэффективность. Подобные когерентные методы маршрути-

зации используются для повышения надежности и безопасности БСД [21]. На рис. 6 показаны различные характеристики протоколов маршрутизации БСД, которые можно интегрировать при разработке эффективного протокола маршрутизации для конкретного приложения.



Рис. 6. Характеристики протоколов маршрутизации БСД

Многопутевые функции в протоколах маршрутизации в БСД могут обеспечить дополнительную выгоду от их использования за счет снижения частоты обновления маршрутов, сбалансированности узловых нагрузок трафика, увеличения скорости доставки данных [22]. Соответственно, это увеличивает срок службы и надежность БСД. Ранее исследователи предлагали использовать квазиоптимальные пути маршрутизации с низким энергопотреблением [23] или выбирать маршрут, базируясь на величине остаточной энергии мотов [24]. Авторы в [25] предлагают компромисс между издержками трафика и надежностью, используя многопутевую маршрутизацию в БСД.

В работах [26–29] предложены относительно новые методы оптимизации поиска пути на графе: муравьиный алгоритм (алгоритм подражания муравьиной колонии) или метод интеллекта стаи (децентрализованный способ работы, имитирующий поведение роя социальных насекомых, стай птиц или косяков рыб).

Протоколы маршрутизации, которые используют запросы, распространяющиеся по сети, известны как протоколы маршрутизации на основе запросов. Алгоритмы маршрутизации Directed Diffusion и Rumor routing [21] специально реализованы для моделей доставки данных, управляемых запросами, где моты, удовлетворяющие требованиям запроса, устанавливают приоритеты для маршрутов, по которым данные направляются к узлу назначения или УСИ. Алгоритмы маршрутизации, основанные на согласовании, устраняют избыточные данные и используют специальные сообщения согласования, чтобы гарантировать отсутствие избыточности данных перед их передачей. Примером подобного протокола является Sensor Protocols for Information via Negotiation

(SPIN) [30]. Маршрутизация на основе КО [31–34] гарантирует, что данный тип маршрутизации в БСД соответствует определяемым конкретным приложением индикаторам КО: задержке, энергии, пропускной способности, надежности, отказоустойчивости, целостности данных и т.д. Агрегирование данных также является важным аспектом БСД и их приложений и часто учитывается при проектировании и разработке протоколов маршрутизации для обеспечения эффективной работы сети. Важно не только защитить данные и узлы в БСД, но и шаблоны сетевого трафика, поскольку ненадежные или даже временные моты могут перенаправлять трафик, вводить ложные данные или вовсе уничтожать пакеты, внося тем самым хаос в БСД. Здесь традиционно используемые методы криптографии с асимметричным ключом или сложной криптографии с симметричным ключом невозможны из-за ограниченных ресурсов БСД [35]. Хотя существуют методы обеспечения безопасных режимов в БСД на уровне канала передачи данных, для повышения надежности сети исследователи разрабатывают новые методы защиты протоколов маршрутизации [36].

C. Протоколы обмена информацией MAC на канальном уровне

Протоколы MAC (Medium Access Control) управления доступом к среде на уровне канала передачи данных служат для управления доступом устройств сети к БПКС, а также методами установления задержки передачи данных, используемыми в случае возникновения конфликта, например, когда несколько мотов пытаются передать информацию одновременно по одному и тому же каналу. В традиционных беспроводных сетях для обеспечения одновременной передачи нескольких сообщений без возможных коллизий БПКС искусственно разбивается на несколько подканалов с использованием методов множественного доступа с временным (Time Division Multiple Access, TDMA), частотным (Frequency Division Multiple Access, FDMA) или кодовым (Code Division Multiple Access, CDMA) разделением каналов. Ранее устройства БСД в целях экономии энергии использовали собственную одноканальную радиосвязь для каждого мота, что требовало наличия и обслуживания сложных многоканальных радиостанций [37]. Однако недавние достижения в системах радиосвязи привели к появлению многоканальных радиостанций для мотов БСД.

Протоколы MAC для БСД основаны на установлении расписания пользования радиосвязью мотами или правил конкуренции между мотами. Протоколы MAC на основе расписания или резервирования составляют специальный порядок доступа к физической среде, которому должны следовать моты, чтобы избежать возникновения коллизий. Протоколы MAC, основанные на конкуренции, не требуют наличия подобного расписания. Вместо этого они создают алгоритм установления задержек по времени передачи, который управляет интервалами времени выхода на связь мотов, если между ними возникает конфликт при доступе к физической среде. Протоколы на основе расписания могут работать в синхронном, асинхронном и гибридном режимах. Поскольку протокол MAC напрямую управляет моментами выхода мота на связь, преобладающим методом снижения энергопотребления является введение так называемого «рабочего цикла», при котором узлы, ожидая возможную связь, «просыпаются» на короткий период в каждом

цикле для прослушивания канала. Если канал оказывается занятым, узлы готовятся к приему данных, в противном случае они переключаются в спящий режим. Этот механизм значительно снижает время простоя прослушивания канала, который определяет основную потерю энергии в БСД [38].

Протоколы MAC на основе синхронного расписания требуют синхронизации времени и знания информации о топологии сети, чтобы обеспечить одновременную активность соседних мотов для связи с УСИ. Асинхронные протоколы не требуют такой информации и инициируют обмен данными между мотами в их различных активных циклах. Протоколы MAC, основанные на конкуренции, не требуют затрат на установление синхронизации или изучение топологии сети, как в протоколах MAC на основе расписания.

Моты могут моментально передавать пакеты данных, а потом повторять передачу в случае возникновения коллизии. Усовершенствованный подход состоит в том, чтобы периодически контролировать БПКС, чтобы в случае его простоя сразу обеспечить передачу собственного пакета. Это общая концепция множественного доступа с контролем несущей (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, CSMA/CD), которая является канонической для протоколов MAC на основе конкуренции. В работе [39] авторы определили четыре главных фактора, вызывающих «бесполезное» потребление энергии:

- Возникновение коллизий.
- «Подслушивание» (прослушивание сообщений, предназначенных для других мотов, – Overhearing).
- Передача служебных/управляющих пакетов.
- Прослушивание канала передачи данных в режиме ожидания (Idle Listening).

Когда два мота (или более) одновременно передают данные, их соответствующие пакеты искажаются, что требует проведения повторных передач, а это ведет к увеличению потребления энергии и задержек передаваемой информации. Энергия, потребляемая при подслушивании, – это энергия, затрачиваемая на прослушивание неинформативных для данного мота пакетов. Отправка и получение управляющих пакетов без полезных данных также расточительна с точки зрения потребляемой энергии. Прослушивание канала даже при отсутствии радиопередач считается прослушиванием в режиме ожидания, когда мот датчика периодически включает свой радиомодуль и проверяет наличие сигнала пробуждения, измеряя энергию в БПКС, что является дополнительным потреблением энергии [38]. Протоколы CSMA/CD, основанные на конкуренции, обладают низкой сложностью реализации, гибкостью, мобильностью (Mobility – способность автономного выполнения распределенных вычислительных задач [39, 40]), возможностью использования изменяющихся моделей трафика [37]. Однако протоколы MAC на основе расписания TDMA обладают характерными для них функциями энергосбережения, поскольку в случае их использования отсутствуют коллизии, подслушивание и прослушивание в режиме ожидания. Из-за требования экономии энергии, необходимой в БСД с ограниченными ресурсами, важно, чтобы протоколы MAC для БСД включали примитивы, эконо-

мияющие энергию за счет уменьшения коллизий и подслушивания, сокращения передачи служебных управляющих пакетов и времени прослушивания канала в режиме ожидания без необходимости организации долгостоящей синхронизации мотов по времени.

Протоколы MAC требуют разной степени взаимодействия и совместного функционирования мотов для обеспечения доступа к управлению ими и БПКС. Исчерпывающий обзор протоколов MAC представлен в [43]. Протоколы MAC, специально разработанные для включения таких важных функций, как безопасное управление электропотреблением и КО, описаны в [44].

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе подробно исследованы основные виды БСД и традиционно используемые топологии таких сетей, а также архитектура БСД и протоколы обмена данными между узлами на трех уровнях: транспортном, сетевом и канала передачи данных.

Рассмотрена проблема обеспечения надежности БСД и дан обзор основных методов ее повышения.

Рассмотрены задачи и способы организации режимов восстановления работы БСД после возможных сбоев некоторых мотов и потери информационных пакетов и предложены варианты повышения надежности сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mahdy A., Deogun J.S.* Wireless Optical Communications: a Survey // Proc. of the 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. – Atlanta, USA: IEEE, 2004. – P. 2399-2404.
2. *Li G., Xu Z., Xiong C., Yang C., Zhang S., Chen Y., Xu S.* Energy-efficient Wireless Communications: Tutorial, Survey, and Open Issues // IEEE Wireless Communications, 2011. – Vol. 18, Iss. 6. – P. 28-35.
3. *Li P., Huang X., Fang Y.* Capacity Scaling of Multihop Cellular Networks // Proc. of the IEEE INFOCOM Conf. – Shanghai, China: IEEE, 2011. – P. 2831-2839.
4. *Ghosh A., Wolter D.R., Andrews J.G., Chen R.* Broadband Wireless Access with WiMax/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential // IEEE Communication Mag. – 2005. – Vol. 43, No. 2. – P. 129-136.
5. *Stankovic J.A., Wood A.D., HeGreig D.* Realistic Applications for Wireless Sensor Networks. – Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks. Monographs in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 835-863.
6. *Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E.* Wireless Sensor Networks: a Survey // Computer Networks, 2002. – Vol. 38, No. 4. – P. 393-422.
7. *L'vov A.A., Klenov D.V., Kuzin S.A., Svetlov M.S., L'vov P.A.* Radar-Based Wireless Sensor Network for Distributed Measurement Systems // Proc. of the Int. Conf. on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Minsk, Belarus, 2018. – P. 1-6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457040/
8. *J., Mukherjee B., Ghosal D.* Wireless Sensor Network Survey // Computer Networks, 2008. – Vol. 52. – P. 2292-2330.
9. *Finogeev A.G., Finogeev A.A.* Information attacks and security in wireless sensor networks of industrial SCADA systems // J. of Industrial Information Integration. – 2017. – Vol. 5. – P. 6-16.
10. *Prodanovic R., Rancic D., Vulic I., Zoric N., Bogicevic D., Ostojic G., Sarang S., Stankovski S.* Wireless Sensor Network in Agriculture: Model of Cyber Security // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (6747). – P. 1-22. – DOI: 10.3390/s20236747.
11. *Xia F.* QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks // Sensors. – 2008. – Vol. 8, No. 2. – P. 1099-1110.
12. *Mahmood M.A., Seah W.* Reliability in Wireless Sensor Networks: Survey and Challenges Ahead // Computer Networks. – 2015. – Vol. 79. – P. 166-187.

13. Nassr M., Jun J., Eidenbenz S., Hansson A., Mielke A.M. Scalable and Reliable Sensor Network Routing: Performance study from field deployment // Proc. 26th IEEE INFOCOM. – Anchorage, USA: IEEE, 2007. – P. 670-678.
14. Engels M. Wireless OFDM Systems: How To Make Them Work? – Kluwer Academic Publishers, 2002. – 197 p.
15. Xiao Y., Li X., Li Y., Chen S. Evaluate Reliability of Wireless Sensor Networks with OBDD // Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC). – Dresden, Germany: IEEE, 2009. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICC.2009.5199006.
16. De Moraes C.C., Agrawal D.P. Ad Hoc & Sensor Networks. New Jersey : World Scientific Publishing Co., 2006. – 642 p.
17. Hart J.K., Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? // Earth-Science Reviews. – 2006. – Vol. 78. – P. 177-191.
18. Shen C., Harte S., Popovic E., O'Flynn B., Atkinson R., Ruzzelli A. Automated protocol selection for energy efficient WSN applications // Electronic Letters, 2009. – Vol. 45. – No. 21. – P. 1098-1099.
19. Ardkani S.P. Data Aggregation Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: a Taxonomy // Int. J. of Computer Networks & Communications. 2017. – Vol. 9, No. 2. – P. 89-107.
20. Paek J., Govindan R. RCRT: Rate-Controlled Reliable Transport for Wireless Sensor Networks // Proc. of the 5th Int. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '07). – Sydney, Australia, 2007. – DOI: 10.1145/1322263.1322293.
21. Rathnayaka A.J.D., Poddar V.M. Wireless Sensor Network Transport Protocol: A Critical Review // J. of Network and Computer Applications, 2011. – Vol. 36, Iss. 1. – P. 134-146.
22. Vuran M., Akyildiz I. XLP: A Cross-Layer Protocol for Efficient Communication in Wireless Sensor Networks // IEEE Trans. on Mobile Computing. – 2010. – Vol. 9, No. 11. – P. 1578-1591.
23. Al-Karaki J.N., Kamal A.E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey // IEEE Wireless Communications. – 2004. – Vol. 11, No. 6. – P. 6-28.
24. Wang Z., Bulut E., Szymanski B.K. Energy Efficient Collision Aware Multipath Routing for Wireless Sensor Networks // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Communications. – Dresden, Germany: IEEE, 2009. – P. 1-5. DOI: 10.1109/ICC.2009.5198989.
25. Shah R.C., Rabaey J.M. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks // Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. – Orlando, Florida: IEEE, 2002. – Vol. 1. – P. 350-355.
26. Chang J.H., Tassiulas L. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks // IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004. – Vol. 12, No. 4. – P. 609-619.
27. Dulman S., Nieberg T., Wu J., Havinga P. Trade-off Between Traffic Overhead and Reliability in Multipath Routing for Wireless Sensor Networks // Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. – New Orleans, USA: IEEE, 2003. – Vol. 3. – P. 1918-1922..
28. Saleem K., Fisal N., Hafizah S., Kamilah S., Rashid R. A Self-Optimized Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks // Int. J. of Recent Trends in Engineering (IJRTE). – 2009. – Vol. 2, No. 1. – P. 93-97.
29. Okdem S., Karaboga D. Routing in Wireless Sensor Networks Using an Ant Colony Optimization (ACO) Router Chip // Sensors. – 2009. – Vol. 9, No. 2. – P. 909-921.
30. Saleem M., Di Caro G.A., Farooq M. Swarm Intelligence Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks: Survey and Future Directions // Elsevier Information Sciences. – 2011. – Vol. 181, No. 20. – P. 4597-4624.
31. Kulik J., Heinzelman W., Balakrishnan H. Negotiation-based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks // Wireless Networks. – 2002. – Vol. 8, No. 2/3. – P. 169-185.
32. Cao Y., He C., Jiang L. Energy-efficient Routing for Mobile Agents in Wireless Sensor Networks // Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China. – 2007. – Vol. 2 (2). – P. 161-166.
33. Kusy B., Lee H.J., Wicke M., Milosavljevic N., Guibas L. Predictive QoS Routing to Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks // Proc. of the Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). – San Francisco, USA: IEEE, 2009. – P. 109-120.
34. Ben-Othman J., Yahya B. Energy Efficient and QoS Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks // Elsevier J. of Parallel and Distributed Computing. – 2010. – Vol. 70, No. 8. – P. 849-857.
35. Chen Y., Nasser N., El Salti T., Zhang H. A multipath QoS routing protocol in wireless sensor networks // Int. J. of Sensor Networks. – 2010. – Vol. 7, No. 4. – P. 207-216.
36. Zhou Y., Fang Y., Zhang Y. Securing Wireless Sensor Networks: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2008. – Vol. 10, No. 3. – P. 6-28.
37. Sheu J.-P., Jiang J.-R., Tu C. Anonymous Path Routing in Wireless Sensor Networks // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Communications (ICC). – Beijing, China: IEEE, 2008. – P. 2728-2734.
38. Langendoen K., Halkes G. Energy Efficient Medium Access Control // Embedded Systems Handbook. – CRC Press, 2005. – P. 34.1-34.29.
39. Chen M., Kwon T., Yuan Y., Leung V.C.M. Mobile Agent Based Wireless Sensor Networks // J. of Computers. – 2006. – Vol. 1 (1). – P. 14-21.
40. Huang X., Fang Y. Multiconstrained QoS Multipath Routing in Wireless Sensor Networks // Wireless Networks, 2008. – Vol. 14, No. 4. – P. 465-478.
41. Tang L., Yanjun S., Gurewitz O., Johnson D.B. PW-MAC: An Energy-efficient Predictive-wakeup MAC Protocol for Wireless Sensor Networks // Proc. of IEEE INFOCOM, Shanghai, China: IEEE, 2011. – P. 1305-1313.
42. Ye W., Heidemann J., Estrin D. An Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks // Proc. of the INFOCOM 2002. – New York, USA: IEEE, 2002. – Vol. 3. – P. 1567-1576.
43. Buettner M., Yee G.V., Anderson E., Han R. X-MAC: a Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks // Proc. of the 4th Int. Conf. on Embedded Networked Sensors. – Boulder, USA: IEEE, 2006. – P. 307-320.
44. Yigitli M., Incel O., Ersoy C. QoS-aware MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey // Elsevier Computer Networks. – 2011. – Vol. 8, No. 1. – P. 1982-2004.
45. L'vov A.A., Svetlov M.S., Klenov D.V. The Principles of Ensuring High Reliability of Remote Test Monitoring // 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov, Russia: IEEE, 2016. – P. 1-5. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879036.
46. Svetlov M.S., L'vov A.A., Dolinina O.N., Klenov D.V. Self-Synchronized Encoding and Decoding Algorithms Based on Code Signal Feature // Proc. of the 27th Int. Conf. RADIOELEKTRONIKA. – Brno, Czech Republic: IEEE, 2017. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/RADIOLEK.2017.7936641.
47. L'vov A.A., Klenov D.V., L'vov A.A., Svetlova M.K. Synchronization Techniques for the Information Channel with Codec Based on Code Signal Feature // Proc. of the Int. Conf. on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Minsk, Belarus: IEEE, 2018. – P. 1-6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457052/.
48. Svetlov M.S., L'vov A.A., Klenov D.V., Sytnik A.A., Dolinina O.N., Svetlova M.K. Information channel synthesis for remote test monitoring // Proc. of the Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2018. – Vol. 1. – P. 101-104.

Предсказание погрешности триангуляции

Пантелей Павел Александрович

Акционерное общество «Научно-конструкторское
бюро вычислительных систем»
Таганрог, Россия
pavel-panteluk@mail.ru

Аннотация. Целью данной работы ставится освещение проблематики оценки погрешности триангулируемых координат, описание применения оцененной погрешности в алгоритмах SLAM, описание способа оценки погрешности пригодного как для оценки погрешности координат, так и для оценки погрешности оптимальных параметров метода наименьших квадратов. Корректность работы метода проверяется на ряде синтетических наборов данных.

Annotation. This work aims to highlight the problem of estimating the error of coordinates of triangulated coordinates. The main goals of this work are describing the application of the estimated error in SLAM algorithms, describing an error propagation method suitable for estimating the error of the triangulated landmark coordinates, and estimating the error of the optimal parameters of the least-squares method. The correctness of the method is checked on several synthetic data sets.

Ключевые слова наименьшие квадраты, распространение ошибки, погрешность измерений, триангуляция.

Keywords least squares, error propagation, measurement uncertainty, triangulation.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одновременное картографирование и локализация (SLAM) – метод позволяющий строить карту с бортовых сенсоров мобильных роботов, автомобилей, летательных аппаратов и оценивать свое положение в ней [1–5]. В качестве бортовых сенсоров выступают лидары, радары, цифровые видеокамеры, которые “наблюдают” некоторые ориентиры – хорошо локализуемые объекты, которые будут складываться в карту в результате работы метода SLAM. Видеокамеры в качестве сенсора набирают все большую популярность благодаря низкой стоимости, малым габаритам, весу и энергопотреблению. Однако природа визуальных измерений камеры требует больше математической и алгоритмической обработки, а так же разработки алгоритмов триангуляции координат видимых ориентиров и оценки погрешности триангулированных координат. В отличии от алгоритмов триангуляции, которым посвящен ряд работ [6–10], оценке погрешности уделено мало внимания: в большинстве работ, повсевременных алгоритмов SLAM, этот момент опускается либо упоминается вскользь; зачастую погрешность триангулированных координат ориентира задается статическими коэффициентами, которые не меняются ни в зависимости от условий наблюдения, ни в зависимости от параметров сенсора. Такая ситуация приводит к следующим проблемам: снижается точность локализации и увеличивается количество гиперпараметров алгоритма SLAM, что усложняет его настройку.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

A. Триангуляция

Триангуляция – важная задача для 3D-реконструкции координат ориентиров в области компьютерного зрения. Для точки X в трехмерном пространстве существует точка на плоскости изображения камеры, такая что $x = PX$, где x – точка на плоскости изображения камеры, P – проекционная камера. Точку x можно получить тривиальным образом, зная P и X , однако получить X , зная P и x – нетривиальная задача. Нахождение X по известным P и x есть задача трехмерной триангуляции.

Наиболее перспективным методом триангуляции (по соотношению скорости работы и точности) является метод средней точки (анг. Midpoint triangulation) [11, 12]. Метод средней точки заключается в минимизации суммы квадратов расстояний от оцениваемого ориентира до лучей визирования на этот ориентир с каждого ракурса:

$$\underset{X}{\operatorname{argmin}} \sum \| (I - r_i r_i^T)(X - t_i) \|^2, \quad (1)$$

где $r_i = R_i K^{-1} x_i$ – луч визирования на ориентир единичной длины, R_i – матрица поворота камеры, t_i – вектор трансляции камеры, $K = \begin{pmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

где fx, fy, cx, cy – фокусные расстояния по осям и координаты принципиальной точки соответственно [13]. Поскольку минимальное возможное значение функции (1) равно нуля, функцию можно переписать как:

$$\sum (I - r_i r_i^T) X = \sum (I - r_i r_i^T) t_i. \quad (2)$$

Уравнение (2) является линейным уравнением относительно X и решается стандартными методами:

$$X = (\sum (I - r_i r_i^T))^{-1} \sum (I - r_i r_i^T) t_i. \quad (3)$$

Для общности можно выразить уравнение (3) в матричном виде:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b, \quad (4)$$

где $A_i = I - r_i r_i^T$ – подматрица 3×3 начиная с $i \times 3$ строки матрицы A , $b_i = (I - r_i r_i^T) t_i$ – сегмент вектора b начиная с $i \times 3$ строки.

Уравнение (4) описывает решение задачи наименьших квадратов. Решение этого уравнения даст нам оценку координат наблюдателя, но не даст нам оценку неточности определения координат.

Геометрическая интерпретация метода средней точки приведена на рис. 1. Максимальный угол между лучами визирования есть угол параллакса.

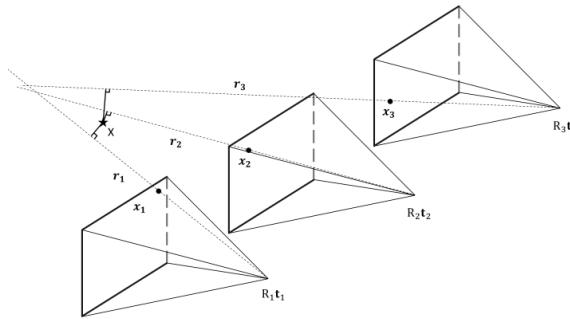


Рис. 1. Геометрическая интерпретация метода средней точки. Перпендикулярами обозначены минимизируемые расстояния от ориентира к лучам визирования

B. Распространение ошибки нелинейных квадратов

Если учесть, что лучи визирования на ориентир содержат в себе гауссовский шум, то этот шум «распространится» и будет содержаться в оценке координат ориентира. Погрешность определения координат ориентира в данном случае является погрешностью косвенных измерений, где лучи визирования на ориентир – косвенные измерения с некоторой погрешностью.

Для осуществления оценки погрешности косвенных измерений необходимо предоставить матрицу ковариации измерений и линейную функцию трансформации измерений [14, 15]. В случае нелинейной функции трансформации (пересчета из косвенных измерений в искомую величину) необходимо предоставить якобиан этой функции:

$$\Sigma^f = J \Sigma^x J^T, \quad (5)$$

где Σ^f искомая матрица ковариации, Σ^x – матрица ковариации измерений.

В задачах минимизации суммы квадратов разностей обратная ковариационная матрица $W = \Sigma^{f-1}$ используется в качестве весовой матрицы, которая взвешивает вектор невязки $r^T W r$ [16].

Поскольку уравнение (4) нелинейно относительно измерений r_i (инверсия матрицы), то для расчета матрицы ковариации Σ^f необходимо найти якобиан функции $(A^T A)^{-1} A^T b$ относительно измерений. Можно обозначить матрицу A и вектор b как функцию от некоторых параметров α :

$$(A(\alpha)^T A(\alpha))^{-1} A(\alpha)^T b(\alpha), \quad (6)$$

где α – вектор параметров, определяющих матрицу A и вектор b . Для простоты записи параметризация $A(\alpha)$ и $b(\alpha)$ опускается. Далее приводится серия уравнений, необходимых для расчета якобиана решения наименьших квадратов:

$$X = CA^T b, \quad (7)$$

где $C = (A^T A)^{-1}$.

$$\frac{\partial CA^T b}{\partial \alpha_i} = CA^T \frac{\partial b}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial CA^T}{\partial \alpha_i} b;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial CA^T}{\partial \alpha_i} &= C \frac{\partial A^T}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial C}{\partial \alpha_i} A^T, \\ \frac{\partial C}{\partial \alpha_i} &= \frac{\partial (A^T A)^{-1}}{\partial \alpha_i} = -(A^T A)^{-1} \frac{\partial A^T A}{\partial \alpha_i} (A^T A)^{-1}, \\ \frac{\partial A^T A}{\partial \alpha_i} &= A^T \frac{\partial A}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial A^T}{\partial \alpha_i} A, \\ \frac{\partial CA^T b}{\partial \alpha_i} &= \\ CA^T \frac{\partial b}{\partial \alpha_i} &+ \left(C \frac{\partial A^T}{\partial \alpha_i} - \left(C \left(A^T \frac{\partial A}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial A^T}{\partial \alpha_i} A \right) C \right) A^T \right) b. \end{aligned} \quad (8)$$

где $\frac{\partial CA^T b}{\partial \alpha_i} = J_i - i$ -й столбец якобиана искомой функции относительно i -й строки вектора α . Стоит отметить, для расчета якобиана использовались приемы матричного дифференцирования [17]. Матричное дифференцирование осуществляется только относительно скалярной переменной, поскольку производная матричного выражения в общем случае тензор, применение которого не очень удобно.

C. Оценка погрешности триангуляции

Имея функцию расчета якобиана решения нелинейных квадратов, можно вывести функцию расчета матрицы ковариации координат ориентира. Для этого необходимо определить якобианы $\frac{\partial A}{\partial \alpha_i}$ и $\frac{\partial b}{\partial \alpha_i}$, которые используются в уравнении (8):

$$\begin{aligned} \frac{\partial b_i}{\partial \alpha_i} &= \frac{\partial (I - r_i r_i^T) t_i}{\partial x_i} = \\ &= \left(-r_i \frac{\partial r_i^T}{\partial x_i} \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} - \frac{\partial r_i}{\partial x_i} r_i^T \begin{matrix} t_i \\ 0 \end{matrix} \quad -r_i \frac{\partial r_i^T}{\partial x_i} \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} - \frac{\partial r_i}{\partial x_i} r_i^T \begin{matrix} t_i \\ 1 \end{matrix} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\frac{\partial r_i}{\partial x_i} = R \frac{K^{-1}(I \| K^{-1} x_i \| - r_i r_i^T / \| K^{-1} x_i \|)}{\| K^{-1} x_i \|^2} K^{-1}$ – якобиан функции перевода координат проекции ориентира x_i в луч визирования r_i .

Аналогичным образом получаем $\frac{\partial A_i}{\partial \alpha_i}$.

$$\frac{\partial A_i}{\partial \alpha_i} = \left(-r_i \frac{\partial r_i^T}{\partial x_i} \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} + \frac{\partial r_i}{\partial x_i} r_i^T \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \quad -r_i \frac{\partial r_i^T}{\partial x_i} \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} + \frac{\partial r_i}{\partial x_i} r_i^T \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \right). \quad (10)$$

D. Оценка погрешности проецирования

В алгоритмах SLAM зачастую используется минимизация суммы квадратов репроекционной ошибки, при этом для корректной работы алгоритма минимизации необходимо задать весовую матрицу, соответствующую обратной матрице ковариации ошибки определения координат ориентира $W_r = \Sigma_r^{-1}$.

Матрицу ковариации репроекционной ошибки Σ_x можно легко рассчитать, имея функцию проецирования точки на плоскость изображения камеры и матрицу ковариации ошибки определения координат ориентира Σ_x :

$$\Sigma_x = J_p \Sigma_r J_p^T, \quad (11)$$

где J_p – якобиан проекционной функции:

$$J_{pi} = \frac{\partial R_i^T(X-t_i)/R_i^T(X-t_i)_2}{\partial \alpha_i} = F J_{proj} \left(R_i^T(X-t_i) \right) R_i^T, \quad (12)$$

где $F = \begin{pmatrix} fx & 0 \\ 0 & fy \end{pmatrix}$,

$$F J_{proj} (p) = \begin{pmatrix} 1/p_z & 0 & -p_x \left(\frac{1}{p_z} \right)^2 \\ 0 & 1/p_z & -p_y \left(\frac{1}{p_z} \right)^2 \end{pmatrix}.$$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанный способ расчета матрицы ковариации определения координат ориентира и матрицы ковариации репроекционной ошибки реализован на языке python. Результаты аналитического расчета сравниваются с результатом симуляции Монте-Карло [18]. Симуляция осуществлялась с параметрами, приведенными в табл. 1. Весь код триангуляции, аналитического расчета погрешностей, построения графиков доступен в репозитории [19].

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ СИМУЛЯЦИИ

параметр	значение	размерность	описание
fx	900	пиксель	фокусное расстояние по ox
fy	900	пиксель	фокусное расстояние по oy
cx	400	пиксель	принципиальная точка по ox
cy	300	пиксель	принципиальная точка по oy
σ	2	пиксель	погрешность локализации проекции ориентира
d	300	метр	расстояние до ориентира
N	5000		количество итераций метода Монте-Карло

Координаты триангулированного ориентира, полученные методом Монте-Карло и эллипсоид матрицы ковариации, рассчитанной аналитическим способом, приведены на рис. 2. Координаты проекции ориентира, полученные методом Монте-Карло и эллипс матрицы ковариации, рассчитанной(ЫЕ,ЫЙ) по формуле (11), приведены на рис. 3. Сравнение измеренных и предсказанных погрешностей триангуляции по каждой координате ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) приведено на рис. 4. График зависимости погрешности локализации от количества используемых в расчете лучей на ориентир приведен на рис. 5.

Из приведенных графиков и изображений можно сделать вывод, что описанная модель предсказания погрешности работает практически идентично методу Монте-Карло, за исключением случаев, когда угол параллакса крайне мал (1–2 градуса), но такие случаи на практике не рассматриваются, поскольку погрешность при таком угле параллакса очень велика. На графике зависимости погрешности определения координат ориентира от количества лучей визирования (рис. 5) можно заметить, что при увеличении количества лучей ошибка снижается, но незначительно, и снижается асимптотически. Такая ситуация возникает из-за самой природы триангуляции и из-за систематической ошибки самого метода триангуляции. Систематическую ошибку можно скорректировать, используя нелинейный метод триангуляции с линеаризацией второго порядка, однако на практике это достаточно вычислительно затратно.

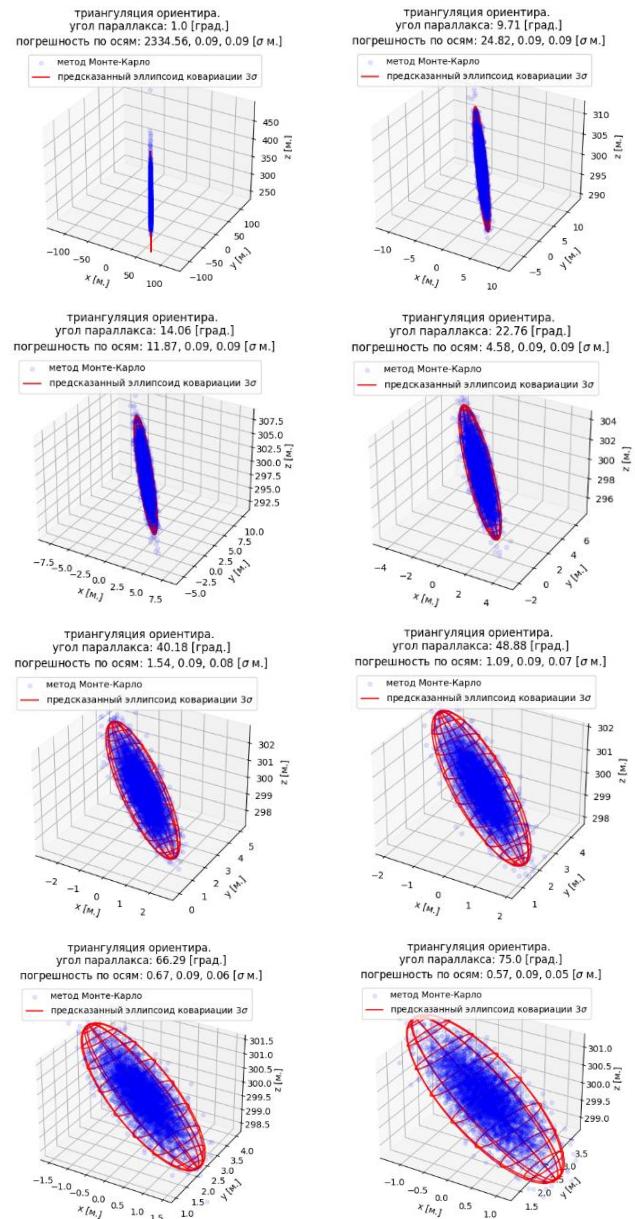
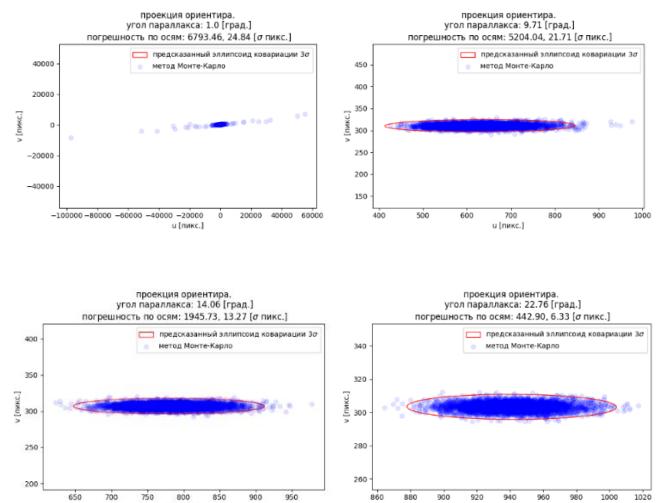


Рис. 2. Сравнение аналитического расчета матрицы ковариации ориентира и методом Монте-Карло



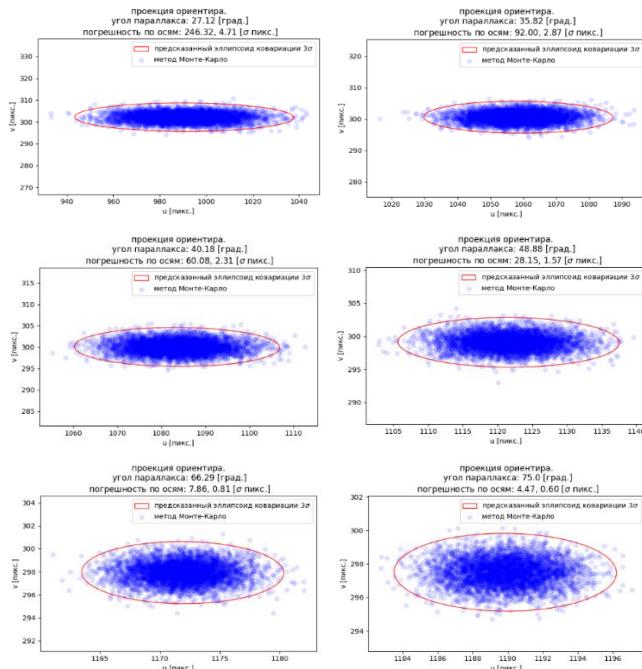


Рис. 3. Сравнение аналитического расчета ковариации проекции ориентира и методом Монте-Карло

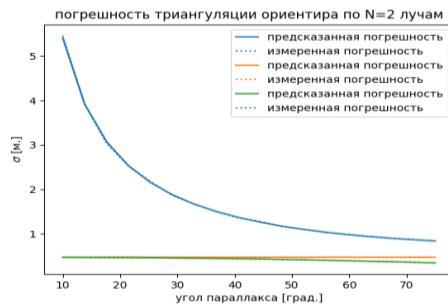


Рис. 4. График сравнения предсказанной погрешности триангуляции и измеренной

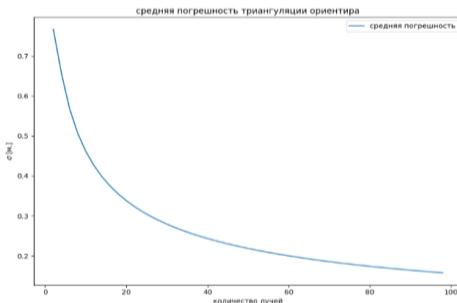


Рис. 5. График зависимости ошибки триангуляции от количества лучей на ориентир

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе освещена проблема оценки погрешности координат триангулируемых ориентиров, описано использование оцененной погрешности в алгоритмах SLAM с практической точки зрения, рассмотрен способ оценки погрешности координат триангулируемых ориентиров, выведены формулы расчета погрешности оценки методом наименьших квадратов. Проведена верификация метода оценки погрешности на синтетических данных, приведено сравне-

ние с методом Монте-Карло. Сравнение показало, что аналитический метод оценки погрешности триангуляции координат ориентира работает практически идентично методу Монте-Карло, что говорит о его применимости на практике. Описанный подход применим при условии, что позиции и ориентации камер, с которых происходит триангуляция известны и не являются случайными величинами, что зачастую не так применимо к алгоритмам SLAM. Поэтому в дальнейших работах предлагается учитывать погрешности позиции и ориентации в предсказании погрешности триангуляции координат ориентира. Из рис. 5 можно заметить, что использование большого количества лучей визирования снижает ошибку триангуляции незначительно, и при этом не пропорционально сильно повышает вычислительную сложность. Использование минимального количества лучей для получения нескольких решений и их объединение с учетом их погрешностей возможно позволит получить лучшее решение при меньших вычислительных затратах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mur-Artal R., Montiel J.M.M., Tardos J.D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system // IEEE transactions on robotics. – 2015. – Т. 31, №. 5. – С. 1147-1163.
2. Bailey T., Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II //IEEE robotics & automation magazine. – 2006. – Vol. 13, No.. 3. – P. 108-117.
3. Davison A.J. et al. MonoSLAM: Real-time single camera SLAM // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2007. – Vol. 29, No. 6. – P. 1052-1067.
4. Thrun S., Montemerlo M. The graph SLAM algorithm with applications to large-scale mapping of urban structures // The International Journal of Robotics Research. – 2006. – Vol. 25, No. 5-6. – P. 403-429.
5. Engel J., Stückler J., Cremers D. Large-scale direct SLAM with stereo cameras // 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2015. – P. 1935-1942.
6. Chen J. et al. Multi-view triangulation: Systematic comparison and an improved method // Ieee Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 21017-21027.
7. Min Y. L-infinity norm minimization in the multiview triangulation // International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – P. 488-494.
8. Li H. A practical algorithm for L triangulation with outliers // 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2007. – P. 1-8.
9. Hartley R., Kahl F. Optimal algorithms in multiview geometry // Asian conference on computer vision. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 13-34.
10. Kang L., Wu L., Yang Y.H. Robust multi-view l2 triangulation via optimal inlier selection and 3d structure refinement // Pattern Recognition. – 2014. – Vol. 47, No. 9. – P. . 2974-2992.
11. Yang K. et al. Iteratively reweighted midpoint method for fast multiple view triangulation //IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 4, No. 2. – P. 708-715.
12. Lee S.H., Civera J. Triangulation: why optimize? // arXiv preprint arXiv:1907.11917. – 2019.
13. Zheng B. et al. Positioning sensor by combining photogrammetry, optical projection and a virtual camera model // Measurement Science and Technology. – 2013. – Vol. 24, No. 10. – P. 105106.
14. Tellinghuisen J. Statistical error propagation // The Journal of Physical Chemistry A. – 2001. – Vol. 105, No. 15. – P. 3917-3921.
15. Terejanu G. et al. Uncertainty propagation for nonlinear dynamic systems using Gaussian mixture models // Journal of guidance, control, and dynamics. – 2008. – Vol. 31, No. 6. – P. 1623-1633.
16. Ruppert D., Wand M.P. Multivariate locally weighted least squares regression // The annals of statistics. – 1994. – P. 1346-1370.
17. Petersen K.B. et al. The matrix cookbook // Technical University of Denmark. – 2008. – Vol. 7, No. 15. – P. 510.
18. Hammersley J. Monte carlo methods. – Springer Science & Business Media, 2013.
19. Least squares error propagation (2021) // репозиторий на GitHub <https://github.com/Lishen1/lstsq-error-propagation> Просмотрено: 20.09.2021.

Секция VI

**СОВРЕМЕННЫЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ
ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ**

DOI: 10.18522/syssyn-2021-49

**Сингулярность – вероятностное управление
личностной трансформацией**

Боев Игорь Викторович

Ставропольский государственный
медицинский университет
Ставрополь, Россия
i.boev@bk.ru

Боев Олег Игоревич

Ставропольский государственный
медицинский университет
Ставрополь, Россия
oleg-boev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются условия трансформации личности, когда случайно или целенаправленно среднестатистические психофизиологические параметры личности приближаются к точке сингулярности, которая обнаружена экспериментальным путем. Приводятся примеры военнослужащих и больных, но реакция трансформации одинакова. Даются результаты многомерного дискриминантного анализа.

Annotation. The article considers the conditions of personality transformation, when accidentally or purposefully the average psychophysiological parameters of the personality approach the point of singularity, which is discovered experimentally. Examples of military personnel and patients are given, but the reaction of transformation is the same. The results of a multidimensional discriminant analysis are given.

Ключевые слова: психофизиологические исследования, точка сингулярности, трансформация личности.

Key words: psychophysiological research, singularity point.

Проблема психологического управления личностью человека всегда занимала умы управленческих элит, стремившихся к подчинению, роботизации как отдельного человека, так и групп лиц, к их безуказненному выполнению требуемых инструкций. Рассматривая личность с позиций конституциологии, мы придерживались собственной концепции конституционально-континуального пространства личности (Боев И.В., 1999), согласно которой выделены три конституциональных диапазона: нормы-акцентуации, пограничной аномальной личности (ПАЛ) и диапазон личностных расстройств-психопатии (рис.1). Каждый человек рождаясь, наделен чертами характера и свойствами личности, соответствующими тому или иному

диапазону. Поэтому на первом этапе проводится диагностика определения принадлежности к тому или иному конституциональному диапазону.

В зависимости от принадлежности к конкретному конституциональному диапазону степень предрасположенности к тем или иным аномалиям личности, поведения и психических расстройств нарастала по мере движения в конституциональном континууме от нормы к психопатии. Если в диапазоне нормы-акцентуации предрасположенности к аномалиям и заболеваниям были минимальны, чаще отсутствовали вообще, а лица отличались высокой социальной ответственностью и личностной надежностью, что позволяло им успешно работать и созидать на любом поприще. Высшие свойства личности отличались высоким уровнем развития (совестливость, антиципация, эмпатичность, нравственность...). В тоже время уже в диапазоне ПАЛ лица характеризовались набором личностных и поведенческих аномалий, которые препятствовали подчинению требованиям общества и затрудняли следование алгоритмам желаемого поведения. В диапазоне ПАЛ лица отличались нестабильностью характера, необязательностью, на них трудно положиться во взаимоотношениях и лишь угроза неизбежного административного, правового наказания вызывала «рефлекс подчинения». Высшие свойства личности в большей или меньшей степени дефицитарны и меняются на свои антиподы (эгоистичность, сребролюбие, завистливость, алчность, злобность, лживость...). Представители диапазона психопатии постоянно вступают в противоречие с законом и по меткому выражению К. Шнейдера «...ни сами не могли жить

спокойно», ни окружающим не давали спокойной жизни. Отличаются безнравственностью, аморальностью, жестокостью, черствосердием, жестокостью.

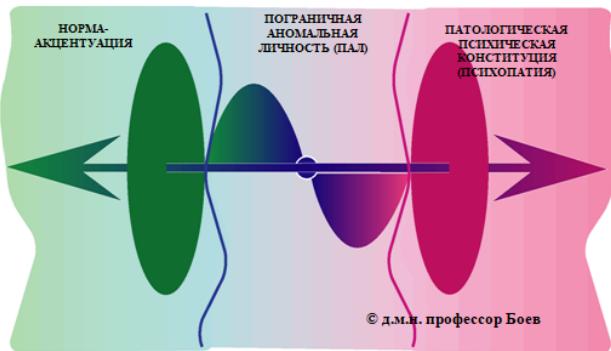


Рис. 1. Диапазоны конституционально-континуального пространства личности

Многолетние экспериментально-психологические, психофизиологические и клинико-психопатологические лонгитюдные исследования подростков, молодежи и взрослых в советский и постиндустриальный периоды нашего общества подтвердили, что представители конституционального диапазона нормы-акцентуации в большинстве своем, даже в периоды смены общественной формации, следуют критериям нравственности и общечеловеческой морали, стремясь к созиданию, реализуя возможности творчества, как на уровне ремесленничества, так и на уровне ученого. Представители диапазона ПАЛ в большинстве соответствуют критериям поведения и отношений типа «ничего личного, это просто бизнес», подчеркивая следование бесчеловечным антигуманным принципам, которые больше подходят для социальной деструкции, для психологического терроризма в условиях, когда «все позволено» и наказания можно избежать.

Второй диагностический этап позволяет определить к какому личностному психотипу относиться человек – к циклоидному, шизоидному, истероидному, эпилептоидному или смешанному психотипу в любом конституциональном диапазоне. Двухэтапная психологическая, психофизиологическая или иная диагностика дает возможность избежать обобщенных и часто лишенных содержательной части оценок человека, а использовать характеристики, основывающиеся на врожденных качествах личности, что позволяет не только диагностировать, но и с высокой степенью точности прогнозировать поведение человека в различных ситуациях.

Целью многолетних исследований являлось изучение возможности комплексной дифференциации пациентов с психическими и личностными расстройствами различного происхождения и прогнозирования состояний улучшения или ухудшения по конституциональному вектору «норма-патология» и по клиническому вектору «здоровье – болезнь».

Материал и методы. В эмпирическом клинико-психопатологическом, экспериментальном патопсихологическом, психофизиологическом и математическом исследовании было задействовано 460 человек, мужского и

женского пола, жителей Ставропольского края и СКФО, в возрасте 18–65 лет, проходивших обследование и/или лечение в Клинике пограничных состояний Ставропольского государственного медицинского университета, с психическими и личностными расстройствами, которые соответствовали нозологическим клиническим критериям МКБ-10 для эндогенных, экзогенных и психогенно детерминированных психических расстройств.

Для проведения статистической обработки полученных результатов использовался дискриминантный и кластерный анализ, которые решали задачу «распознавания образов» или разбиения на группы, удовлетворяющего некоторому критерию оптимальности, что позволяло на основе данных измерений количественных и качественных характеристик объектов разбить множество объектов на кластеры (подмножества) так, чтобы каждый объект принадлежал только одному подмножеству разбиения, причем объекты, принадлежащие одному и тому же кластеру, должны быть сходными, а принадлежащие разным кластерам – разнородными.

Использовался квадрат Махalanобиса и чем большее было арифметическое значение, тем дальше друг от друга отстояли исследуемые группы в трехмерном Евклидовом пространстве, тем больше сравниваемые группы разнородны, и наоборот, что в конечном итоге. Геометрические и стереометрические проекции наблюдений позволяли визуализировать результаты математического анализа и наглядно представить целостную «голографическую» картину результатов патопсихологического психофизиологического исследования (И.В. Боев, С.Ф. Ступак, 1979).

Полученные результаты. На материале из 1320 испытуемых, из которых было 460 подростков (14–17 лет), 280 лиц опасных профессий (20–45 лет), 232 военнослужащих (18–45), 348 больных психическими заболеваниями (18–65 лет) подтверждена возможность дифференциации каждого испытуемого по их принадлежности к одному из трех диапазонов конституционального пространства личности с последующей патопсихологоматематической и психофизиологоматематической дифференциацией по четырем структурам личностного психотипа (по вектору «норма-патология»).

С помощью кластерного анализа при обследовании военнослужащих (комбатантов) было выделено 5 подкластеров, среди которых диагностированы, например, психотипы эпилептоидов и циклоидов, расположивающиеся в переходном диапазоне нормы – пограничной аномальной личности (рис. 1) по вектору «норма-патология». Применяя дискриминантный анализ, обнаружили, что D^2 Махalanобиса равен 6,71 условным единицам, подтверждая достоверность различий в психофизиологической интегральной оценке функционального состояния комбатантов. Достоверность результатов подчеркивается и значением T^2 Хотеллинга равного 58,74 условных единиц. Ошибки психофизиологической дискриминации в группе циклоидного психотипа составляют 19,05%, а в группе эпилептоидного психотипа – лишь 6,67% ошибок.

Психофизиолого-математическая модель дискриминантной диагностики комбатантов сравниваемых групп дает убедительную картину возможности дискриминации на основе интегральной оценки функционального состояния («фактор отклонения» – FO) человека:

$$Y = 0.1607X_1 + 0.0873X_2 + (-1.3951)X_3 + 0.2755X_4 + 0.2442X_5 + (-0.2427)X_6 + 0.4899X_7 + 0.4845X_8 + 0.1254X_9 + (-0.3384)X_{10} + (-0.4055)X_{11} + 0.0542X_{12} + (-0.1337)X_{13} + (-0.1427)X_{14} + 0.1766X_{15} + (-0.1887)X_{16} + 0.3017X_{17} + 0.7662X_{18} + 0.0398X_{19} + (-0.8980)X_{20} + 0.0861X_{21} + 0.1417X_{22}$$

где X_1 - X_{22} – значения конкретных психофизиологических показателей.

Если после подстановки в формулу значений X вычисленное значение Y будет больше дискриминантного индекса R , то результаты обследования комбатанта следует отнести к группе с эпилептоидным психотипом, если же значение Y будет меньше R – то к группе с циклоидным психотипом. Определены психофизиологические маркеры дискриминации, которые подтвердили психолого-биологическую уязвимость комбатантов-циклоидов с высоким риском дрейфа среднестатистических параметров к точке S (рис. 3) и развитием эмоциональной и поведенческой дезадаптации до уровня личностных расстройств, в противоположность эпилептоидному психотипу,

Далее, проведенные сравнительные клинико-психопатологические, психофизиологические, клинико-психофармакотерапевтические и катамнестические исследования сравниваемых групп пациентов по вектору «здоровье-болезнь» обнаружили взаимосвязь между клинической гетерогенностью психических расстройств шизофренического спектра (шизофрения, шизоаффективный психоз, аффективные расстройства) и структурой личностного психотипа больных.

В научных исследованиях всегда остро стоит вопрос о верификации диагноза, в частности, психических заболеваний, имеющих различную нозологическую принадлежность. Результаты современных психофизиологических методов исследования больных подверглись математической непараметрической обработке в виде дискриминантного анализа, позволившего построить исходную психофизиолого-математическую модель дифференциальной диагностики между параноидной формой шизофрении с рекуррентным течением и шизоаффективным психозом (ШАП). Результаты подтвердили высокий уровень верификации нозологической принадлежности больных в психофизиологическом пространстве психических расстройств шизофренического спектра. На достоверном уровне доказаны не только клинические различия, но и различия психофизиологического гомеостаза больных в зависимости от нозологической принадлежности.

Возможность построения психофизиолого-математической модели дифференциальной диагностики между больными шизофренией параноидной формы с рекуррентным течением и, страдающими шизоаффективным психозом (ШАП), поселяет в сознании исследователей определенную уверенность в существовании или отсутствии различий между нозологическими единицами психических расстройств по классификации МКБ-10:

$$Y = 0,331X_1 + 0,571X_2 + 1,009X_3 + 0,250X_4 - 1,295X_5 - 1,283X_6 - 1,148X_7 - 0,347X_8 + 0,399X_9 - 0,223X_{10} + 0,593X_{11} + 1,410X_{12} + 1,745X_{13} - 0,064X_{14} - 0,135X_{15} - 0,808X_{16} - 0,569X_{17} + 0,194X_{18} - 0,129X_{19} + 0,183X_{20} + 1,071X_{21} + 0,101X_{22} + 0,054X_{23} - 0,138X_{24} - 1,057X_{25} - 1,014X_{26} - 0,022X_{27} - 1,038X_{28} - 1,007X_{29} - 2,021X_{30} + 0,089X_{31} - 0,137X_{32} - 0,035X_{33} + 1,712X_{34} + 0,285X_{35} + 0,843X_{36} + 0,201X_{37} - 0,233X_{38} - 0,006X_{39} + 0,018X_{40} - 0,437X_{41} + 0,861X_{42} - 0,198X_{43} + 0,726X_{44} - 0,115X_{45} - 0,159X_{46} + 0,156X_{47} - 0,013X_{48} + 0,148X_{49} - 0,085X_{50} + 0,157X_{51} + 0,251X_{52} - 0,185X_{53} + 0,015X_{54} + 0,065X_{55} - 0,210X_{56} + 0,008X_{57} - 0,050X_{58} - 0,146X_{59} + 0,055X_{60} + 0,173X_{61} - 0,147X_{62} + 0,182X_{63} - 0,087X_{64} - 0,068X_{65} - 0,160X_{66},$$

где X_{1-66} – конкретное значение психофизиологических параметров (ИУ с 1 по 22 параметр, ПС с 23 по 44 параметр, ФО с 44 по 66 параметр) в виде исходного уровня.

После подстановки полученных психофизиологических параметров в уравнение и выполнения арифметических действий мы получаем определенное значение Y , если значение Y больше дискриминантного индекса R , то результаты психофизиологического исследования правомерно отнести к группе больных шизофренией, если полученное значение Y будет меньше индекса R , то результаты будут свойственны больным с ШАП. Если мы спроектируем среднестатистические психофизиологические результаты в трехмерном пространстве (Евклидово пространство), то получим распределение результатов каждого больного именно в своей группе.

Сравниваемые группы больных удалены друг от друга в пространстве на 7,3 условных единицы (рис. 2), что отражает значение квадрата Махalanобиса и подтверждает высокий уровень достоверности проведенной психофизиологической дифференциальной диагностики.

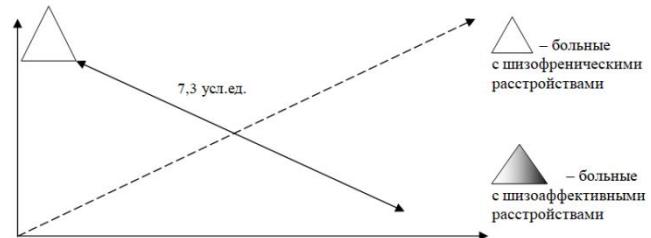


Рис. 2. Проекции средних значений 66 психофизиологических параметров в трехмерное Евклидово пространство, как модель дифференциальной диагностики между больными шизофренией и шизоаффективным психозом (значение квадрата Махalanобиса)

Таким образом, мы убеждаемся в возможности дифференциального разграничения между больными шизофренией и ШАП с последующей объективизацией результатов на психофизиологическом уровне, подтверждая, тем самым, различия в нозологической принадлежности исследуемых больных. При этом, больные рекуррентной формой шизофрении на доказательном уровне связаны с шизо-циклоидным психотипом личности, а больные ШАП – с циклоидным психотипом личности.

Аналогичным образом проведен сравнительный анализ результатов психофизиологического обследования больных ШАП. Результаты психофизиолого-математический исследований в трактовке дискриминантного анализа также позволили на достоверном уровне верифицировать принадлежность больных нозологической группе шизоаффективного психоза, подтвердив высокое сходство параметров психофизиологического гомеостаза между аффектдоминантной и шизодоминантной формами ШАП, что еще раз доказывает нозологическую самостоятельность шизоаффективного психоза (рис. 3).

Представленные комплексные результаты исследований дают основание утверждать принадлежность личностных конституциональных истоков: соответственно аффектдоминантной формы – к циклоидной структуре личности, а шизодоминантной формы – к шизоидной структуре личности. Больные двух клинических форм ШАП по комплексу среднестатистических параметров распределяются в конституционально-континуальном пространстве личности в диапазоне пограничной аномальной личности (ПАЛ) (рис. 3).



Рис. 3. Конституциональный диапазон пограничной аномальной личности с распределением больных, страдающих шизоаффективным психозом

Этот факт свидетельствует о том, что все больные до начала манифестиации шизоаффективного психоза характеризовались аномальной личностной изменчивостью с личностными и поведенческими девиациями разной степени выраженности. Важная особенность, больные аффектдоминантной формой ШАП, располагаясь в верхней синусоиде ПАЛ, в конституциональном личностном континууме были приближены к границам диапазона психологической нормы-акцентуации, что само по себе детерминирует более благоприятное течение психического заболевания.

Больные аффектдоминантной формой ШАП отличались проявлением преморбидных психотипологических черт, у которых среднестатистические психологические и психофизиологические параметры располагаются на территории верхней синусоиды диапазона ПАЛ конституционально-континуального пространства личности (рис. 3). В отличие от этого, у больных с шизодоминантной формой ШАП личностный преморбид был представлен психотипологическими чертами, свойственными конституциональному диапазону ПАЛ, но с расположением среднестатистических параметров на

территории нижней синусоиды. Следует обратить внимание на появление сингулярной точки S (рис. 3), разделяющей верхнюю и нижнюю синусоиды диапазона ПАЛ в процессе проведения дискриминантного анализа.

Дословно с латинского языка сингулярность переводится как «единственный, особенный»; математики называют это «точкой функции..., точкой перехода в бесконечность... в иное пространство-время...». «Космологическая сингулярность – состояние Вселенной в начальный момент Большого взрыва. Технологическая сингулярность – гипотетический момент, по прошествии которого технический прогресс станет настолько быстрым и сложным, что окажется недоступным пониманию». Естественно, возникает вопрос, что же может произойти в процессе психофизиолого-математического анализа, когда обнаруживается перемещение всех изучаемых среднестатистических параметров в точку сингулярности.

При этом, аффектдоминантные формы ШАП располагаются в клиническом континууме на границе с биполярным аффективным расстройством (БАР), а больные с шизодоминантными формами ШАП соответственно на границе клинического континуума с шизофренией. Нельзя не обратить внимание на тот факт, что границы клинического континуума между психическими заболеваниями (биполярное аффективное расстройство, шизоаффективный психоз и шизофрения) условны и «размыты» и во многом зависят от типа течения заболеваний. Не следует забывать об их расположении в психопатологическом пространстве расстройств шизофренического спектра (Смулевич А.Б. с соавт., 2019). Однако, конституционально-генетическая структура личности потенциальных больных, их среднестатистические психофизиологические и психологические характеристики будут соответствовать одному из трех рассматриваемых психических заболеваний шизофренического спектра, что, в свою очередь, по вектору «норма-патология» соответствует всегда лишь одному из трех конституциональных психотипологических диапазонов – это диапазон пограничной аномальной личности.

Деструктивные внешние факторы (социальная нестабильность, разрушение нравственных устоев общества, нейроинтоксикации, психотравмы и иные триггеры), вступая во взаимодействие с конституционально-генетическими основами личности, видоизменяют среднестатистические психолого-биологические параметры, «заставляя» личность «перемещаться» по синусоидам конституционального диапазона ПАЛ, собираясь и/или соединяясь в сингулярную точку S. Сингулярную точку S в нашем случае правильно толковать как место перехода, психопатологического криза в виде трансформации аномальных личностных расстройств, свойственных диапазону ПАЛ, в негативные психопатологические образования на пике психоза. Обнаруженная сингулярность (сингулярная точка S), тем самым, раскрывает уязвимость личности к собственно эндогенному психическому процессу. В это же время происходит быстрое, иногда мгновенное формирование, напоминающее «взрыв черной дыры в космосе», в позитивные психопа-

тологические расстройства шизофренического спектра, в данном случае, в виде конкретных клинических форм ШАП. Следовательно, главный психопатологический и патопсихологический процесс, объяснимый математическими закономерностями, – это трансформация аномальных личностных расстройств в негативную психопатологическую симптоматику, т.е. переход конституционально обусловленных психических, личностных, характерологических проявлений на клинический и необратимый уровень психопатологического пространства шизофренического спектра. Это иной уровень существования личности.

Хотелось бы акцентировать внимание на этом процессе перехода в сингулярной точке S из плоскости конституционального личностного континуума по вектору «норма-патология» в принципиально иное состояние, в иную плоскость уже клинической изменчивости, клинического континуума по вектору «здоровье-болезнь», в частности, психических расстройств именно шизофренического спектра. Подобное расширенное допущение в отношении всего шизофренического спектра, неограниченное только рамками клиники ШАП, но и личностными расстройствами.

Анализ манифестации психических расстройств ШАП показал, что личность человека в состоянии предманифестации (клинически, психологически, патопсихологически и психофизиологически) характеризуется нарастанием аномальной изменчивости изучаемых среднестатистических параметров с их динамикой, последующей неуклонной концентрацией в области сингулярной точки S. Вслед за концентрацией всех показателей в точке сингулярности создаются условия для психолого-биологического «взрыва», когда наступает качественно иное состояние личности в виде перехода совокупности количественных параметров в качественно иное состояние. Из конституционально детерминированной аномальной личности «рождается» иная, психически большая личность, что и представляет иное существование. Если нарисовать аномальную среднестатистическую изменчивость личности в состоянии предманифестации ШАП, то перечисленные параметры на количественном уровне трансформируются из аномальных в патологические, которые «проплавиваясь» в сингулярное место перехода, эту математическую точку перехода конституционального пространства личности и, «возрождаются» в качественно новой ипостаси уже на клиническом уровне в форме грандиозных позитивных (интеллектуальный бред воображения, острый параноидный синдром в картине наглядно – образного бреда или острый параноидный синдром с выраженным фомами идеаторного бреда...) и негативных психических расстройств (дизгармонии личности, патохарактерологических расстройств в виде отклонений от норм морали, утраты духовных свойств личности и этики отношений, эмоциональной холодности...), в частности, в структуре ШАП. Отмечается прямо пропорциональная зависимость между выраженностью конституционально обусловленных характерологических аномалий и проявлениями необратимой негативной психопатологической симптоматики после прохождения через сингулярную точку, уже после завершения острого психоза. Например, эмоциональная холод-

ность трансформируется в эмоциональную черствость, эмоциональную пустоту; безынициативность – в гипобулию, личностный регресс; гипертимные черты личности – в гипоманию-манию, гипотимные черты личности – в субдепрессию-депрессию, наконец, в апатическое состояние.

Последующие исследования выявили на математически доказательном уровне соответствие между клинической формой ШАП, типом течения болезни и структурой личности больного. Если рассматривать клинический континуум слева направо, то ближе всех к биполярному аффективному расстройству (БАР) располагаются больные с аффектодоминантной формой ШАП, среди которых, в соответствии к клинической статистикой, с фазным течением болезни преобладали больные с циклоидной структурой личностного психотипа; при фазно-рекуррентном течении ШАП преобладали больные с шизо-циклоидным личностным психотипом; для приступообразно-прогредиентного течения аффектодоминантной формы ШАП были характерны больные с шизоидным личностным психотипом.

Таким образом, используя кластерный и дискриминантный непараметрический анализ при обработке патопсихологических и/или психофизиологических параметров у различных групп подростков, испытуемых, комбатантов, пациентов, располагающихся в конституциональном диапазоне пограничной аномальной личности, обнаруживается сингулярная точка «перехода... провала», соответствующая психопатологическому клиническому или патопсихологическому личностному кризу. После пережитого криза регистрируется, объективизируется личностная изменчивость в виде негативной психопатологической симптоматике или патологическое психопатоподобное расстройство. На примере военнослужащих-комбатантов мы наблюдали личностную изменчивость после пережитого боевого стресса, у лиц с циклоидным психотипом стресс оказался настолько деструктивным, что вызвал негативный личностный дрейф к сингулярной точке S в конституциональном пространстве с формированием аномальной личностной изменчивости. В тоже время у лиц с эпилептоидным психотипом негативного дрейфа к сингулярной точке S не произошло, стресс не оказался столь деструктивным и психолого-биологический криз был, по сути, предотвращен и личность комбатантов не достигла степени аномальной личностной изменчивости.

В условиях «естественного» эксперимента представители личностных психотипов различно реагировали на боевой стресс. Теоретически можно предположить, что аналогичная искусственная обстановка может вызвать негативный личностный дрейф у наиболее уязвимых представителей того или иного личностного психотипа с последующим деструктивным аномальным или патологическим изменением личности, когерентным социальной деструкции в виде агрессии или аутоагgressии.

На примере психических расстройств у больных шизофренического спектра было также показано деструктивное влияние сингулярной точки S в клиническом пространстве, сопровождающееся личностной трансформацией из конституционального пространства лич-

ности в клиническое пространство заболевания в виде признаков дефицитарности личности. Правомерно предположить возможность аналогичной личностной и/или психопатологической изменчивости в условиях нахождения в искусственной среде, когда, зная психолого-биологическую уязвимость конкретной личности больного, можно вызвать или достичь негативного дрейфа к сингулярной точке S, с развитием по типу «взрыва» явной негативной психопатологической симптоматики, приводящей к социальной дезадаптации.

При исключении искусственных факторов, вызывающих негативную психопатологическую симптоматику, вполне возможно, что этот результат был бы достигнут много позже.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Боев И.В.* Пограничная аномальная личность. – Ставрополь, 1999.
2. *Боев И.В., Ступак С.Ф.* ФОРГРАН-программа для дискриминантного анализа. – М., 1979, ВНИЦ. – С. 1-9, инв. номер П. 003496.
3. *Смулевич А.Б.* Расстройства шизофренического спектра в общемедицинской практике // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. – 2016. – Т. 116, № 1. – С. 4-9.

Моделирование и управление деятельностью студентов в интернет-пространстве

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. Цель настоящего исследования – систематизация моделей, описывающих информационно-образовательную деятельность студентов в интернет-пространстве, и определение наиболее перспективных способов управления такой деятельностью. Рассмотрены содержательно-логические, процессуальные, стилевые и сценарные модели деятельности, а также прямые и опосредованные способы управления ею. Показано, что в силу самоорганизуемого характера онлайновой активности студентов целесообразно использовать комбинированное и сопровождающее управление.

Annotation. The purpose of this study is to systematize the models describing the information and educational activities of students in the Internet space, and to determine the most promising control ways of such activities. The content-logical, procedural, stylistic and scenario models of activity, as well as direct and indirect control methods, are considered. It is shown that, due to the self-organizing nature of students' online activity, it is advisable to use combined and supportive management.

Ключевые слова: учебная деятельность, модель, онлайн-обучение, веб-поиск, управление, самоорганизация.

Keywords: learning activities, model, online learning, web search, control, self-organization.

I. ВВЕДЕНИЕ

Учитывая такие характеристики современного VUCA-мира, как изменчивость, неопределенность, сложность, неоднозначность, важнейшим качеством образовательной технологии должна выступать ее способность интегрировать формальное образование с самообразованием и саморазвитием будущего профессионала. В условиях цифровой трансформации образования, ускоренной необходимостью удаленного обучения в связи с пандемией COVID-19, современные образовательные технологии в той или иной форме опираются на информационно-коммуникационные средства и действуют сеть Интернет. В связи с этим, как регламентированная образовательной программой, так и самообразовательная деятельность обучающихся во многих своих аспектах осуществляется в интернет-пространстве, что в связи с избыточностью информации в онлайн-среде позволило

трактовать ее как информационно-образовательную. Под информационно-образовательной деятельностью (ИОД) понимается самостоятельная социально, личностно и интернет обусловленная познавательная, поисковая, коммуникативная, информационно-созидательная и развлекательно-познавательная активность субъекта, реализующаяся посредством сети интернет, направленная на решение образовательных задач и/или имеющая результатом расширение его жизненного, образовательного, профессионального опыта [1]. Такая деятельность имеет разные формы и виды. Она может быть [Там же]:

1) формальной, реализующейся в процессе освоения образовательных программ (изучение онлайн-курсов, использование систем управления обучения, образовательных интернет-ресурсов, электронных библиотек и пр.);

2) неформальной, способствующей удовлетворению потребностей личностного и профессионального развития субъекта (освоение самостоятельно выбранных онлайн-курсов, участие в вебинарах, видеоконференциях, олимпиадах, конкурсах, использование образовательных и развивающих интернет-ресурсов и пр.);

3) информальной, сопровождающей повседневную деятельность человека и способствующей стихийному накоплению опыта (использование образовательно-развлекательных ресурсов, участие в сетевых самоорганизующихся сообществах, процессах обмена информацией и пр.).

Рассматривая образовательную технологию как теоретически обоснованную совокупность способов, приемов и средств обучения, а также планомерную систему действий (взаимодействия) обучающихся и педагога, позволяющих получать запланированные результаты, можно говорить о том, что в основе любой образовательной технологии лежит определенный способ педагогического управления деятельностью обучающихся. Как правило, под управлением понимается процесс организации специального воздействия на объект, в результате которого объект переходит в желаемое состояние. Относительно образовательной деятельности можно говорить о целевом состоянии как приобретении студентом определенного опыта. Основой управления является описание объекта и работа с информацией о состоянии

объекта и внешних условиях для определения воздействий на объект, обеспечивающих решение задачи управления [2]. Поэтому первым этапом в разработке управления является построение модели объекта.

Цель настоящего исследования – систематизация моделей, описывающих информационно-образовательную деятельность студентов в интернет-пространстве, и определение наиболее перспективных способов управления такой деятельностью.

II. Модели информационно-образовательной деятельности

A. Деятельность как объект моделирования

Деятельность человека можно рассматривать с позиции макро- и микроанализа, внешнего и внутреннего аспектов, содержательно-логической и процессуально-временной структуры [3]. Для моделирования деятельности используются различные подходы: функциональный, этапный, стилевой, сценарный и другие.

Результаты проведенных исследований [3–5] показали, что *информационно-образовательная деятельность студентов носит самостоятельный характер и преимущественно сконцентрирована в учебно-познавательном и поисково-познавательном видах*, которые выступают как отдельными, так и сквозными для других видов ИОД (коммуникативно-познавательной, информационно-сози-дательной и развлекательно-познавательной). Именно поиск информации, ее восприятие и анализ, а также понимание и применение, т.е. встраивание новых знаний и умений в имеющийся опыт, являются сущностными процес-сами обучения. Эти виды деятельности предполагают не только когнитивные, но и регулятивные и метакогнитивные действия студентов по организации самостоятельной учебной, познавательной и поисковой активности. Поэтому в обзор и анализ моделей ИОД включим соответствующие виды деятельности и виды моделей.

B. Содержательно-логические модели

Традиционно образовательная деятельность обучающихся рассматривается в аспекте ее форм, методов и средств реализации, ведущих к обозначенному в цели результату. Более детальные модели включают в содержательно-логическую структуру как внешние составляющие, связанные с реализуемыми действиями и операциями, так и внутренние, связанные с мотивацией, целеполаганием, планированием, рефлексией ре-зультатов. Так, например, в структуре самостоятельной образовательной деятельности студентов с исполь-зованием информационно-коммуникационных техно-логий, выделяют следующие компоненты: мотиваци-онно-ориентировочный (учебные мотивы и стремле-ния), целеполагающий, содержательно-операционный (знания и умения для выполнения деятельности), организационно-управленческий (планирование и регуля-ция), исполнительский и контрольно-оценочный (ре-флексивный) [6]. Модели поисковой деятельности челове-ка в интернет-пространстве включают пользователя информации, пользовательские потребности, запрос информации, обмен, использование информации и удовлетворенность (неудовлетворенность) поль-зователя результатами поискового запроса [7].

Еще один подход в моделировании деятельности – по-строение онтологической, аксиологической, морфологиче-ской и праксиологической моделей. Онтологическая модель информационно-образовательной деятельности описывает ее сущностные основы и детерминанты [3]. ИОД характе-ризуется субъектностью, активностью, предметностью, целенаправленностью, осознанностью; имеет цель, пред-метное содержание, средства и способы, результат. Аксио-логическая модель ИОД определяет ее ценностно-смысловые основания и связанные с ними мотивационные регуляторы. Морфологическая модель информационно-образовательной деятельности описывает ее форму и строение. Центральным компонентом ИОД является субъ-ект, осуществляющий субъект-объектные и субъект-субъектные взаимодействия, реализуя тот или иной вид активности. Каждый вид ИОД (учебно-познавательная, поисково-познавательная, коммуникативно-познаватель-ная, информационно-сози-дательная, развлекательно-познавательная) предполагает релевантные ему действия и операции, часть которых являются инвариантными, а часть – вариативными, зависящими от индивидуальных особенностей и условий деятельности. Праксиологическая модель информационно-образовательной деятельности описывает процесс ее реализации, а также факторы ее эф-фективности [3].

C. Процессуальные модели

В процессуальных моделях *образовательная дея-тельность обучающихся рассматривается с позиции временной последовательности действий с выделением фаз, стадий или этапов*. Здесь также, как и в содержа-тельно-логических моделях отражаются внешние и внутренние действия студентов. Так, самостоятельная учебно-познавательная деятельность в интернет-среде включает: этап мотивации и целеполагания, этап актуа-лизации знаний, умений и навыков, этап самостоятель-ного решения поставленной учебной задачи, этап само-организации деятельности (использование различных видов деятельности в интернет-среде в учебных и позна-вательных целях), этап самооценки результатов [8]. В поэтапных моделях поисковой деятельности в интер-нет-пространстве выделяются различные этапы, концеп-туально соотносящиеся с тремя стадиями: начало поиска и построение цепочки, мониторинг и дифференцирова-ние информации, оценка и извлечение информации [9]. Рассматривая поиск как процесс решения проблем, учес-ные выделяют пять составляющих: определение информа-ционной проблемы, поиск информации, сканирование информации, обработка информации, а также организа-ция и представление информации [10].

В зарубежной науке широко используются модели саморегулируемого (self-regulated learning) и самоуправ-ляемого обучения (self-directed learning), которые могут быть применимы для описания ИОД. В структуре само-регулируемого обучения выделяют три фазы: планиро-вание, выполнение и волевой контроль, рефлексивные процессы [11]. Модель самоуправляемого обучения включает пять этапов, которые в зависимости от автор-ской концепции могут несколько различаться. В одних случаях это диагностирование потребностей обучения, формулирование учебных целей, выявление человеческих и материальных ресурсов для обучения, выбор и использование соответствующих стратегий обучения, оценка результатов обучения [12], в других – установле-

ние целей обучения, поиск и получение доступа к ресурсам, принятие плана и выполнение учебных действий, мониторинг и оценка эффективности результатов, переоценка стратегий обучения и определение путей улучшения учебного опыта [13].

На основании анализа отечественных и зарубежных работ, посвященных процессуальному моделированию самостоятельной учебной, познавательной и поисковой деятельности, разработана типовая процессуальная структура информационно-образовательной деятельности, которая включает этапы, определяющие последовательность взаимосвязанных внешних и внутренних действий обучающихся [4]:

- 1) постановка / принятие цели;
- 2) планирование деятельности и поиск ресурсов;
- 3) исполнение (учебные действия);
- 4) отслеживание (самоконтроль, рефлексия, анализ) результатов;
- 5) завершение цикла или коррекция деятельности (возврат к этапу 2) или коррекция цели (возврат к этапу 1).

При этом постановка / принятие цели, исполнение и отслеживание результатов являются инвариантными процессуальными компонентами ИОД, а остальные – вариативными, зависящими от степени самоуправления деятельностью [4].

D. Стилевые модели

К стилевым моделям отнесем стили и стратегии, описывающие индивидуальный стиль деятельности. Стили обучения и познавательной деятельности (когнитивные стили) отражают как особенности познавательной деятельности человека, так и интеграцию когнитивных и личностных ресурсов, определяющие различия в способах учебно-познавательной деятельности, которые во многом определяют ее успешность [14]. Стили обучения описывают ментальные процессы, исполняющие и регулирующие восприятие и переработку информации в целях обучения, отражают совокупность характерных когнитивных, аффективных и физиологических факторов, которые служат относительно стабильными индикаторами того, как учащийся обучается [15].

Классификация стилей обучения и когнитивных стилей проводится в зависимости от скорости и способов работы учащихся с информацией и учебными задачами. Так, например, модель Фелдера-Сильвермана различает стили обучения по четырем параметрам: восприятие (сенсорное / интуитивное), ввод информации (образный / вербальный), информационный процесс (активный / рефлексивный) и понимание (последовательное / глобальное); модель Колба выделяет визуальный, слуховой, читающий и кинестетический стили [15]. Среди когнитивных стилей наиболее распространена дифференциация по критериям импульсивности / рефлексивности, быстроте, точности [16].

Несколько иначе строятся стилевые модели поисково-познавательной деятельности в интернет-пространстве. Как правило, они обозначаются термином «стратегия» и отражают внешние и внутренние параметры, характеризующие веб-поиск: планирование, тщательность, потраченные усилия, критическая/некритическая оценка ин-

формации, критерии оценки информации, фактор времени, фактор случайного поиска, трудности в оценке информации, источники, которыми пользуется студент [17]. В структуре стратегии веб-поиска выделено семь составляющих [18]:

- 1) контроль – навыки навигации и использования поисковых систем в Интернете;
- 2) дезориентация – отсутствие уверенности в поисковом поведении;
- 3) метод проб и ошибок – навыки пробовать разные подходы в поиске;
- 4) решение проблем – навыки и стремление преодолевать трудности или разочарования, возникающие в результате поиска;
- 5) целеустремленное мышление – навыки, необходимые для удержания цели и самоконтроля процесса поиска;
- 6) выбор основных идей – навыки для определения ключевых понятий для поиска информации;
- 7) оценка – умение анализировать и систематизировать информацию, полученную из Интернета.

Эти компоненты стратегии поиска информации составляют три области: поведенческую, процедурную и метакогнитивную. Поведенческая область описывает навыки, необходимые для базовых действий в Интернете, в т.ч. при навигации (контроль и дезориентация). Процедурная область связана с общими поисковыми подходами к поиску в Интернете (метод проб и ошибок и решение проблем). Метакогнитивную область составляют навыки, связанные с познавательной деятельностью высшего уровня в Интернете (целеустремленное мышление, выбор основных идей и оценка) [18].

E. Сценарии

Построение сценариев направлено на выделение ключевых моментов развития исследуемого объекта и разработку на этой основе разных вариантов его динамики, а также на анализ и оценку полученных вариантов, изучение особенностей и возможных последствий их реализации при заданных целевых и критериальных установках в условиях неопределенности [19]. В когнитивистике сценарий рассматривается в качестве исследовательского конструкта, с помощью которого можно осуществить моделирование ментальных презентаций и состояний субъекта [20]. В теории управления выделяют синергические сценарии, моделирующие поведенческие аспекты исследуемой системы, и аттрактивные, характеризующие поведение объекта в соответствии с применимыми управляющими воздействиями [19].

Под сценарием поведения обучающихся в Интернет-пространстве понимается описательная модель информационно-образовательной деятельности, представляющая дискретно фиксируемую последовательность действий обучающегося и ключевых состояний системы «обучающийся – условия и ресурсы Интернет-пространства» [21]. Понимание сценария конкретизируется для разных видов ИОД. Так, например, сценарии поисково-познавательной деятельности отражают пути решения обучающимися поисковой задачи, проявленные навыки и индивидуальные особенности деятельности, а также результат [22].

Из всех рассмотренных моделей именно сценарии наиболее полно отражают индивидуальный стиль и особенности конкретной деятельности. Но это не означает, что сценарии не подлежат типологизации. Она производится в зависимости от решаемых задач. Например, по критериям эффективности и безопасности ИОД выделены четыре типа:

1) *высокоэффективные – безопасные сценарии*: реализован полный цикл самоуправляемой деятельности; цели деятельности напрямую соответствуют ее содержанию и релевантны ведущей мотивации; актуализированы компетенции в сфере ИКТ, когнитивные, метакогнитивные, личностные ресурсы, позволяющие реализовать целеустремленное поведение, результативно выполнять деятельность, регулировать свою активность и управлять временем, преодолевать контентные и коммуникационные риски;

2) *среднеэффективные – безопасные сценарии*: реализованы минимально необходимые компоненты цикла частично-регулируемой деятельности (принятие цели, исполнение, отслеживание результатов); цели деятельности в целом соответствуют ее содержанию и релевантны ведущей мотивации; актуализированы компетенции в сфере ИКТ, когнитивные, метакогнитивные, личностные ресурсы, позволяющие реализовать целеустремленное поведение, выполнять деятельность, регулировать свою активность, преодолевать контентные и коммуникационные риски;

3) *среднеэффективные – рисковые сценарии*: реализованы минимально необходимые компоненты цикла деятельности; цели деятельности не соответствуют ее содержанию и не релевантны ведущей мотивации; актуализированы компетенции в сфере ИКТ и когнитивные ресурсы, необходимые для выполнения деятельности;

4) *неэффективные – рисковые сценарии*: реализованы отдельные компоненты, не составляющие полного цикла деятельности; цели деятельности не соответствуют ее содержанию и не релевантны ведущей мотивации; не актуализированы компетенции в сфере ИКТ, когнитивные, метакогнитивные, личностные ресурсы, необходимые для выполнения деятельности и преодоления рисков.

При решении задачи управления ИОД необходимо расширить исходные сценарии, моделирующие естественную динамику исследуемой деятельности, и создать обогащенные, атрактивные, характеризующие желаемую динамику в условиях управляющих воздействий.

Таким образом, рассмотренные содержательно-логические, процессуальные, стилевые и сценарные модели информационно-образовательной деятельности позволяют говорить о достаточно исследованном проблемном поле, однако в его изучении преобладают описательные методы построения моделей. Их формализация является актуальной задачей в плане построения механизмов управления ИОД.

III. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ

A. Прямые и опосредованные способы управления ИОД

К прямым способам управления отнесем влияние на деятельность обучающегося, к опосредованным – влияние на факторы эффективности такой деятельности. Прямые способы управления, как правило, опираются на редуцированную модель деятельности «цель – действия – результат». Используемые в системах автоматического управления принципы разомкнутого управления – по заданному воздействию или управления по возмущению (принцип компенсации) могут соотноситься с достаточно жестким педагогическим воздействием по типу «материал – рекомендации – тесты – задания – дедлайны», применяемым, например, в асинхронных онлайн-курсах. Очевидно, что в силу большого разброса индивидуальных особенностей студентов такое управление недостаточно эффективно. Более того, *образование в интернет-пространстве, особенно неформальное и информальное осуществляется не по линейной схеме, а имеет гипертекстовую сетевую структуру*, что ограничивает применение разомкнутых способов управления.

Более эффективны принципы управления по отклонению, когда отслеживается выходная величина (в нашем случае конкретный результат обучения) и сравнивается с желаемым (заданным), а различие (отклонение) преобразуется в управляющее воздействие, которое приводит систему к уменьшению этого отклонения. Использование комбинированного управления позволяет задавать требования к информационно-образовательной деятельности, отслеживать промежуточные и итоговые результаты и осуществлять управляющие воздействия, корректирующие деятельность студентов и позволяющие приводить ее к запланированным результатам.

Для использования опосредованных способов управления необходимы расширенные модели деятельности, рассмотренные выше, и понимание основных факторов, определяющих результативность ИОД. Среди таких факторов можно выделить внешние (организацию и дизайн среды онлайн-обучения, наполнение интернет-пространства, качество системы управления обучением и методического обеспечения, компетентность педагогов/наставников и др.) и внутренние (мотивация обучения, метакогнитивные способности и когнитивные стили, умения саморегуляции, компетенции студентов в сфере информационно-коммуникационных технологий и онлайн-общения и др.) [1, 5]. Поскольку внешние факторы косвенно влияют на результаты обучения, преломляясь через внутренние факторы, связанные с характеристиками студентов [23], *целесообразно использовать именно внутренние факторы в качестве приоритетного объекта управляющих воздействий*.

B. Управление самоорганизующейся деятельностью

При проектировании механизмов управления деятельностью важно понимать, что мы управляем самоорганизующимся объектом, и соблюдать необходимый баланс между самоорганизацией деятельности обучающегося и внешним управлением. По степени участия

самого студента в реализации управленческих функций (инициации деятельности, ее направления, регулирования в процессе исполнения, контроля, коррекции) выделены три вида информационно-образовательной деятельности [1]:

1) *частично регулируемая ИОД* – преимущественно исполнительская активность, стимулируемая извне поставленными задачами и внешним контролем;

2) *саморегулируемая ИОД* – целенаправленная активность обучающихся, включающая понимание и постановку образовательной задачи, планирование процесса ее решения, выполнение учебных действий, самоконтроль результатов;

3) *самоуправляемая ИОД* – это внутренне мотивированная, полностью осознанная деятельность, предполагающая постановку образовательных целей и планирование действий; выбор и использование форм, методов, ресурсов; самоконтроль процесса и результатов; оптимизацию и повышение эффективности деятельности.

Наиболее приоритетные с педагогической точки зрения последние два вида предполагают, что *управляющая подсистема частично принадлежит самому управляемому объекту, что делает его также субъектом управления*. Более того, в процессе выполнения информационно-образовательной деятельности изменяется и объект, и субъект управления. Например, повышается или снижается интерес студента к материалу, что влияет на его вовлеченность, настойчивость и предпринимаемые действия; развиваются метакогнитивные способности, что обеспечивает более качественную рефлексию и коррекцию деятельности при ошибках и недочетах.

Таким образом, обучающийся может рассматриваться как совокупность двух подсистем: 1) объекта управления – собственно деятельность по накоплению опыта и 2) подсистемы внутреннего управления (мотивация, саморегуляция деятельности, метакогнитивные способности и пр.). *Внешняя управляющая система должна учитывать естественное движение объекта под влиянием его собственного управления (самоорганизацию) и оказывать воздействие на обе подсистемы.* Причем влияние на подсистему внутреннего управления с педагогической точки зрения является весьма важным, поскольку это позволяет, во-первых, повышать уровень самоорганизации деятельности, во-вторых, развивать ресурсы субъекта, востребованные во всех видах деятельности. Также здесь, как и в управлении любыми самоорганизующимися системами, «важна не столько мощность сигнала управления, сколько его "смысловое" содержание» [24, с. 11]. Наиболее отвечающей всем перечисленным требованиям является такая «мягкая» форма управления, как сопровождение, направленное как на деятельность, так и на внутреннюю подсистему управления ею.

C. Сопровождение как способ управления ИОД

Сопровождение как способ управления предполагает поддержку самоорганизующейся деятельности, способствует предупреждению и преодолению проблем в деятельности, повышению ее продуктивности. Так, например, дидактическое сопровождение самостоятельной учебно-познавательной деятельности студентов в интернет-среде рассматривается как процесс совместного с обучающимися устранения препятствий на пути к запла-

нированному результату и «достижение смыслового консонанса, синхронизации ценностно-смысловых полей студентов и преподавателей в процессе усвоения учебного содержания» [8, с. 47]. Следует учитывать, что *сопровождение должно оказывать влияние и на внутреннюю подсистему управления деятельностью самого студента*, реализовать поддержку мотивации, вовлеченности, саморегуляции, актуализацию волевых ресурсов и целеустремленности.

Сопровождение ИОД может выполнять следующие функции:

1) *мотивационно-стимулирующую* (помощь в постановке целей, поддержка интереса, вовлеченности);

2) *направляющую* (помощь в определении дальнейших действий);

3) *оптимизирующую* (помощь в саморегуляции, контроле, рефлексии, предотвращении рисков);

4) *ограничивающую* (избегание и преодоление рисков).

В контексте работы с многочисленными контентными, кибер- и другими рисками деятельности в интернет-пространстве, снижающими качество этой деятельности или угрожающими здоровью и эмоциональному благополучию обучающихся [5], пути и формы сопровождения ИОД можно определить через формирование различных видов компетенций студентов, техническую и психолого-педагогическую поддержку, позволяющую превентировать и преодолевать соответствующие риски.

D. Технологические решения в управлении ИОД

Поскольку ИОД реализуется с использованием информационно-коммуникационных технологий, сопровождение такой деятельности может осуществляться как человеком, так и современными технологическими средствами: автоматизированными, цифровыми, интеллектуальными системами. Так, например, для превенции рисков может быть реализовано: отслеживание состояния и глазодвигательных реакций студента для определения степени вовлеченности и необходимости сделать перерыв; идентификация сценариев поведения в интернет-пространстве, обнаружение и предотвращение обращения к вредоносному контенту; выявление опасных контактов, предупреждение о них или блокировка.

Наибольшими возможностями управления ИОД обладают интеллектуальные системы учебного назначения, которые по функциональному признаку разделяют на информационно-справочные, консультирующие, интеллектуально-тренирующие, управляющие (диагностико-экспертные системы, сопоставляющие цели обучения, стратегии и достигнутые результаты), сопровождающие (отслеживающие деятельность обучающегося при работе в какой-либо инstrumentальной среде, оказывающие помощь при обнаружении ошибочных действий) [25]. Работа управляющих и сопровождающих систем основана на сборе образовательной аналитики и данных о действиях студента, идентификации объекта управления (составление и перманентное уточнение модели обучающегося и его деятельности), разработке оптимальных управляющих воздействий, приводящих к желаемому состоянию объекта.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы относительно управления информационно-образовательной деятельностью студентов в интернет-пространстве:

1) такое управление может осуществляться на основе прямых способов влияния на деятельность (организации, контроля) или опосредованных, предполагающих влияние на факторы эффективности такой деятельности, в первую очередь, на ее мотивацию и саморегуляцию;

2) для построения опосредованных способов управления необходимы расширенные модели деятельности – содержательно-логические, процессуальные, стилевые или сценарные;

3) принципы разомкнутого управления недостаточно эффективны в управлении такой сложной самоорганизующейся системой, как человеческая деятельность; более целесообразно комбинированное управление по типу сопровождения, которое может осуществляться как педагогом, так и с использованием технологических решений, например, интеллектуальных цифровых ассистентов.

Тенденции развития общества и образования ведут к повышению доли неформального и информального образования, что должно быть связано с ростом уровня самоорганизации деятельности обучающегося, повышением роли внутренней подсистемы управления. Внешнее управление становится все более гибким, что прослеживается и в технологических решениях. От достаточно «жестких» систем управления обучением (learning management systems) мы переходим к адаптивным системам, подстраивающим контент и способы работы к индивидуальным особенностям студентов, а далее движемся к проектированию систем управления опытом (learning experience platform), которые помогают обучающимся выстраивать траекторию и работать со всеми ресурсами интернет-пространства, подбирая как учебный, так и неадаптированный контент.

В свете этих тенденций вопросы превенции рисков и оптимизации деятельности становятся все более актуальными. В целях управления ИОД представляется целесообразным изучать образовательную деятельность как динамическую систему, описывающую процесс перехода из одного состояния в другое и рассматривать эту систему в пространстве с большим числом координат, с учетом атракторов – целей системы [24]. Возможно, идеи синергетики позволят разработать принципиально новые способы управления ИОД и воплотить их в современных технологических решениях с использованием искусственного интеллекта. При этом необходимо понимать ограничения как цифровых решений, так и вообще внешнего управления самоорганизующейся деятельностью человека. Представляющие педагогическую ценность самообразование и саморазвитие могут рассматриваться как передача функций внешнего управления подсистеме внутреннего управления самого студента. И необходимо так проектировать управление информационно-образовательной деятельностью, чтобы решалась эта центральная задача образования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лызь Н.А., Истратова О.Н. Информационно-образовательная деятельность: виды, факторы, риски // Педагогика. – 2019. – № 4. – С. 16-26.
2. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учебник и практикум. – М.: Изд-во Юрайт, 2020. – 276 с.
3. Истратова О.Н., Лызь Н.А. Концептуальная модель информационно-образовательной деятельности обучающихся в интернет-пространстве // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2019. – Т. 8, № 2 (27). – С. 314-318.
4. Лызь Н.А., Истратова О.Н. Процессуальная модель информационно-образовательной деятельности обучающихся // IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 500-507.
5. Лызь Н.А., Истратова О.Н., Лызь А.Е. Возможности и риски информационно-образовательной деятельности студентов в интернет-пространстве // Открытое образование. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 67-74.
6. Куликова С.С. Самостоятельная образовательная деятельность студентов в информационной среде // Человек и образование. – 2007. – № 1-2 (10-11). – С. 100-103.
7. Горюнова Л.Н. Развитие моделей информационного поведения с позиции обобщенной психологической теории деятельности // Вестник Санкт-Петербургского Университета. – 2008. – Сер. 12. – Вып. 3. – С. 439-444.
8. Ращук Л.К. Дидактическая концепция самостоятельной учебно-познавательной деятельности студентов в интернет-среде // автореферат, дис. ... д-ра пед. наук / Российский университет дружбы народов (РУДН). – М., 2013. – 55 с.
9. Ho L.-A., Kuo T.-H., Lin B. The Mediating Effect of Website Quality on Internet Searching Behavior // Computers in Human Behavior. – 2012. – Vol. 28, Iss. 3. – P. 840-848.
10. Walraven A., Brand-Gruwel S., Boshuizen H. P. Information-Problem Solving: A Review Of Problems Students Encounter And Instructional Solutions // Computers in Human Behavior. – 2008. – Vol. 24, Iss. 3. – P. 623-648.
11. Zimmerman B.J., Tsikalas K.E. Can Computer-Based Learning Environments (Cbles) Be Used as Self-Regulatory Tools to Enhance Learning? // Educational Psychologist. – 2005. – Vol. 40, Iss. 4. – P. 267-271.
12. Loyens S.M.M., Magda J., Rikers R.M.J.P. Self-Directed Learning in Problem-Based Learning and its Relationships with Self-Regulated Learning // Educational Psychology Review. – 2008. – Vol. 20, Iss. 4. – P. 411-427.
13. Kim R., Olfman L., Ryan T., Eryilmaz E. Leveraging a Personalized System to Improve Self-Directed Learning in Online Educational Environments // Computers & Education. – 2014. – Vol. 70. – P. 150-160.
14. Истратова О.Н., Кибальченко И.А. Стилевые структуры студентов с разной социальной активностью // Всероссийская конференция по когнитивной науке КИСЭ-2017: Материалы Всероссийской конференции. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2017. – С. 28-40.
15. Truong H.M. Integrating Learning Styles and Adaptive E-Learning System: Current Developments, Problems and Opportunities // Computers in Human Behavior. – 2016. – Vol. 55, Part B. – P. 1185-1193.
16. Кибальченко И.А., Подберезный В.В., Забалуева А.И. Структурные особенности творческих способностей студентов вуза с рефлексивным и импульсивным когнитивными стилями // Российский психологический журнал. – 2017. – Т. 14, № 3. – С. 48-69.
17. Горюнова Л.Н., Круглова М.А., Провоторова Я.А., Цыган В.Н. Стратегии информационного поиска и их взаимосвязь с личностными особенностями студентов // Петербургский психологический журнал. – 2013. – № 2. – С. 1-15.
18. Tsai M.-J. Online Information Searching Strategy Inventory (OISSI): A quick version and a complete version // Computers and Education. – 2009. – Vol. 53, Iss. 2. – P. 473-483.

19. Кульба В.В., Кононов Д.А., Малинецкий Г.Г. Сценарии поведения сложных систем в чрезвычайных ситуациях // В сборнике: Управление рисками чрезвычайных ситуаций: Доклады и выступления. – 2001. – С. 143-152.
20. Кузнецова Ю.М. Сценарный подход к анализу текстов // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2018. – Т. 68, № 1. – С. 31-41.
21. Лызь Н.А., Григорьев А.О. Теоретический базис разработки сценариев поведения обучающихся в интернет-пространстве // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: материалы XXVII научной конференции. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 172-174.
22. Лызь Н.А., Истратова О.Н., Григорьев А.О. Сценарии поискового поведения в контексте безопасности студентов в интернет-пространстве // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2020»: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. Т. 2. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 275-280.
23. Money W.H., Dean B.P. Incorporating Student Population Differences for Effective Online Education: A Content-Based Review and Integrative Model // Computers & Education. – 2019. – Vol. 138. – P. 57-82.
24. Колесников А.А. Проблемы системного синтеза: синергетическая концепция // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ IX Всероссийской научной конференции. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 8-18.
25. Харламова Е.С. Онлайн-образование: обзор технологий и прогноз на будущее // Информационно-технологический вестник. – 2017. – № 4 (14). – С. 182-190.

Региональные вопросы обеспечения образовательного процесса по информационной безопасности в контексте реформирования нормативно-правовой базы

Ермаков Александр Сергеевич

Пятигорский институт (филиал)

«Северо-Кавказский федеральный университет»

Пятигорск, Россия

ermakov@cascad-kmv.ru

Аннотация. За последние пять лет произошли довольно серьезные изменения в законодательной базе относительно обеспечения информационной безопасности объектов информатизации. Введены в действие новые системы классификации объектов информатизации, программных, программно-аппаратных и технических средств обеспечения безопасности. Целью работы является систематизация изменений в нормативно-правовом обеспечении информационной безопасности Российской Федерации для актуализации современных образовательных технологий в области подготовки кадров по защите информации.

Annotation. There have been quite serious changes in the legislative framework regarding the provision of information security of objects of informatization over the past five years. New classification systems for objects of informatization and for software and hardware means of ensuring security have been put into effect. The aim of the paper is systematization of changes in the regulatory and legal support of information security in the Russian Federation to update modern educational technologies in the field of training personnel for information security.

Ключевые слова: защита информации, информационная безопасность, организационно-правовые основы обеспечения информационной безопасности, нормативно-правовая база, образовательные стандарты, дополнительное образование, ФСТЭК России.

Keywords: protection of information, information security, organizational and legal bases of information security, regulatory framework, educational standards, additional education, FSTEC of Russia.

I. ВВЕДЕНИЕ

Политика информационной безопасности Российской Федерации выстраивается в рамках обеспечения национальной безопасности страны в информационной сфере. Основные цели, задачи и приоритетные направления развития данной политики получили отражение в Стратегии национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. N 683, а также в новой Доктрине информационной безопасности Российской

Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 05 декабря 2016 г. N 646. На основе данных документов осуществляется стратегическое планирование и развитие общественных отношений в области обеспечения информационной безопасности.

Применение политики информационной безопасности мы можем наблюдать в динамике развития требований по обеспечению защиты объектов информатизации, разработкой которых занимаются федеральные органы исполнительной власти, уполномоченные в области обеспечения безопасности информационной инфраструктуры Российской Федерации.

Сфера образования в области информационной безопасности достаточно хорошо освещена в Доктрине и, согласно ее текста, находится на довольно низком уровне, что отражается, в частности, в недостаточном кадровом обеспечении в области информационной безопасности, а также низкой осведомленностью граждан в вопросах обеспечения персональной кибербезопасности. В связи с чем, поддержка сферы образования и развитие кадрового потенциала в области обеспечения информационной безопасности являются стратегическими целями [1].

II. ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ОБУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Целью образовательного процесса в контексте образовательных программ по информационной безопасности является подготовка кадров, способных выполнять задачи по приведению объектов информатизации в соответствие требованиям безопасности информации, периодически декларировать соответствие этим требованиям и вести организационный контроль за выполнение требований по защите информации в организации. Основные требования к специалистам, подготовку которых ведут образовательные учреждения, изложены в профессиональных стандартах [2] (табл. 1).

Х Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»

ТАБЛИЦА 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

№ п.п.	Наименование профессионального стандарта	Реквизиты документа, утверждающего профессиональный стандарт
1.	Специалист по противодействию иностранным техническим разведкам	Приказ Минтруда России от 25 декабря 2015 г. N 15с (зарегистрировано в Министерстве России 22 января 2016 г., регистрационный N 40706)
2.	Специалист по обнаружению, предупреждению и ликвидации последствий компьютерных атак	Приказ Минтруда России от 29 декабря 2015 г. N 1179н (зарегистрировано в Министерстве России 28 января 2016 г., N 40858)
3.	Специалист по защите информации в автоматизированных системах	Приказ Минтруда России от 15.09.2016 N 522н (зарегистрировано в Министерстве России 28.09.2016 N 43857)
4.	Специалист по защите информации в телекоммуникационных системах и сетях	Приказ Минтруда России от 03.11.2016 N 608н (зарегистрировано в Министерстве России 25.11.2016 N 44449)
5.	Специалист по безопасности компьютерных систем и сетей	Приказ Минтруда России от 01.11.2016 N 598н (зарегистрировано в Министерстве России 28.11.2016 N 44464)
6.	Специалист по технической защите информации	Приказ Минтруда России от 01.11.2016 N 599н (зарегистрировано в Министерстве России 25.11.2016 N 44443)

Вышеприведенные профессиональные стандарты представляют собой характеристики квалификаций, которые необходимы возможному сотруднику при трудоустройстве для выполнения работы по занимаемой должности. Должности в профессиональных стандартах имеют градацию в соответствие с уровнем профильного образования и опытом работы соискателя: среднетехнический персонал (уровень образования: среднее профессиональное образование), специалисты (уровень образования: высшее образование – бакалавриат), старшие специалисты (уровень образования: высшее образование – специалитет или магистратура), руководители (уровень образования: высшее образование – специалитет или магистратура). В зависимости от уровня программы подготовки кадров в учебном заведении, возможна коррекция рабочих программ учебных дисциплин профессионального модуля для подготовки компетенций слушателей непосредственно в целях дальнейшего трудоустройства к возможным группам должностей на профильные предприятия (организации) региона.

В соответствие с Приказом Минобрнауки России от 29.10.2013 N 1199 и Приказом Минобрнауки России от 12.09.2013 N 1061, по специальности «Информационная безопасность» в средних и высших учебных заведениях проводится обучение слушателей по следующим направлениям подготовки (табл. 2):

ТАБЛИЦА 2. ПЕРЕЧЕНЬ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Шифр специальности	Специальность / направление подготовки	Квалификация	Реквизиты документа, утверждающего образовательный стандарт
10.02.01	Организация и технология защиты информации	Техник по защите информации Старший техник по защите информации	Приказ Минобрнауки России от 28.07.2014 N 805 (ред. от 09.04.2015) (зарегистрировано в Министерстве России 21.08.2014 N 33750)
10.02.02	Информационная безопасность телекоммуникационных систем		Приказ Минобрнауки России от 13.08.2014 N 1000 (ред. от 09.04.2015) (зарегистрировано в Министерстве России 25.08.2014 N 33798)

10.02.03	Информационная безопасность автоматизированных систем		Приказ Минобрнауки России от 28.07.2014 N 806 (ред. от 09.04.2015) (зарегистрировано в Министерстве России 21.08.2014 N 33732)
10.02.04	Обеспечение информационной безопасности телекоммуникационных систем	Техник по защите информации	Приказ Минобрнауки России от 09.12.2016 N 1551 (ред. от 17.12.2020) (зарегистрировано в Министерстве России 26.12.2016 N 44944)
10.02.05	Обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем		Приказ Минобрнауки России от 09.12.2016 N 1553 (ред. от 17.12.2020) (зарегистрировано в Министерстве России 26.12.2016 N 44938)
10.03.01	Информационная безопасность	Бакалавр	Приказ Минобрнауки России от 17.11.2020 N 1427 (зарегистрировано в Министерстве России 18.02.2021 N 62548)
10.04.01	Информационная безопасность	Магистр	Приказ Минобрнауки России от 26.11.2020 N 1455 (зарегистрировано в Министерстве России 18.02.2021 N 62549)
10.05.01	Компьютерная безопасность	Специалист по защите информации	Приказ Минобрнауки России от 26.11.2020 N 1459 (зарегистрировано в Министерстве России 15.02.2021 N 62491)
10.05.02	Информационная безопасность телекоммуникационных систем		Приказ Минобрнауки России от 26.11.2020 N 1458 (зарегистрировано в Министерстве России 15.02.2021 N 62492)
10.05.03	Информационная безопасность автоматизированных систем		Приказ Минобрнауки России от 26.11.2020 N 1457 (зарегистрировано в Министерстве России 17.02.2021 N 62532)
10.05.04	Информационно-аналитические системы безопасности		Приказ Минобрнауки России от 26.11.2020 N 1460 (зарегистрировано в Министерстве России 22.12.2020 N 61702)
10.05.05	Безопасность информационных технологий в правоохранительной сфере		Приказ Минобрнауки России от 26.11.2020 N 1461 (зарегистрировано в Министерстве России 22.12.2020 N 61703)
10.06.01	Информационная безопасность	Исследователь. Преподаватель-исследователь	Приказ Минобрнауки России от 30.07.2014 N 874 (ред. от 30.04.2015) (зарегистрировано в Министерстве России 20.08.2014 N 33692)

Большинство из приведенных выше программ подготовки кадров в области информационной безопасности реализованы в восемнадцати ВУЗах ЮФО и СКФО [3]. В табл. 3 приведен список учебных заведений с перечнем аккредитованных программ.

ТАБЛИЦА 3. ПЕРЕЧЕНЬ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ПОДГОТОВКУ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

№ п/п	Наименование организации, осуществляющей подготовку по направлениям «Информационная безопасность»	Шифр специальности
Республика Дагестан		
1.	Дагестанский государственный институт народного хозяйства	10.03.01
2.	Дагестанский государственный технический университет	10.03.01 10.05.03
3.	Дагестанский государственный университет	10.02.05 10.03.01
Кабардино-Балкарская Республика		
4.	Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова	10.02.05 10.03.01
Ставропольский край		
5.	Северо-Кавказский федеральный университет	10.03.01 10.04.01 10.05.01 10.05.02 10.05.03 10.06.01
6.	Пятигорский государственный университет	10.02.05 10.03.01 10.04.01 10.06.01
Республика Калмыкия		
7.	Калмыцкий государственный университет	10.03.01
Астраханская область		
8.	Астраханский государственный технический университет	10.02.05 10.03.01 10.04.01 10.05.03
9.	Астраханский государственный университет	10.03.01
Волгоградская область		
10.	Волгоградский государственный университет	10.02.04 10.02.05 10.03.01 10.04.01 10.05.02 10.05.03 10.05.05
Республика Адыгея		
11.	Адыгейский государственный университет	10.03.01
12.	Майкопский государственный технологический университет	10.03.01 10.05.04
Краснодарский край		
13.	Кубанский государственный технологический университет	10.03.01 10.04.01 10.05.01 10.05.03 10.06.01
Республика Крым и Севастополь		
14.	Севастопольский государственный университет	10.03.01 10.05.01
Ростовская область		
15.	Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)	10.03.01 10.04.01 10.06.01
16.	Донской Государственный Технический Университет	10.03.01 10.05.01 10.05.02 10.04.01
17.	Южный федеральный университет	10.03.01 10.05.02 10.05.03 10.05.05 10.06.01
18.	Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова	10.05.02 10.04.01

Профессиональные компетенции, реализуемые программами подготовки инженерных кадров по приведенным выше специальностям должны соответствовать требованиям профессиональных стандартов и удовлетворять возможных работодателей, но как показывает практика трудоустройства выпускников, полученных знаний не хватает для полноценной работы без определенной стажировки. Более того, многие предметные вопросы на практике расходятся с преподаваемой теорией, что говорит о необходимости применения дополнительных инструментов в обучении студентов.

С целью большей практикоориентированности учебного процесса предлагается вслед за изменением нормативно-правовой базы в области защиты информации оперативно изменять наполнение лекционных материалов и следить за актуальностью материально-технической базы. Действующие перечни контрольно-измерительного оборудования и нормативно-правовых актов, используемых при проведении работ в области защиты информации, размещены на портале Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК России). В учебных целях достаточно использовать оборудование и методические рекомендации, используемые для защиты конфиденциальной информации. При дальнейшей необходимости выпускникам работать по обеспечению безопасности объектов, обрабатывающих сведения, оставляющие государственную тайну, знаний, полученных, с использованием методик по защите конфиденциальной информации хватит, чтобы быстро перестроиться к новой деятельности, дополнив полученные в учебном заведении сведения методиками ограниченного распространения в части технической защиты информации, тогда как по обеспечению безопасности от несанкционированного доступа на данный момент практически все сведения находятся в открытом доступе. На данный момент на портале ФСТЭК России размещены следующие перечни, необходимые для проработки в учебных заведениях:

- Перечень национальных стандартов, разработанных ТК 362 и принятых Ростехрегулированием (Росстандартом)
- Перечень контрольно-измерительного и испытательного оборудования, средств контроля защищенности, необходимых для выполнения работ и оказания услуг, установленных Положением о лицензировании деятельности по технической защите конфиденциальной информации, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 3 февраля 2012 г. N 79. Утвержден директором ФСТЭК России 19 апреля 2017 г.
- Перечень контрольно-измерительного и испытательного оборудования, программных (программно-технических) средств, необходимых для выполнения работ и оказания услуг, установленных Положением о лицензировании деятельности по разработке и производству средств защиты конфиденциальной информации, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2012 г. N 171. Утвержден директором ФСТЭК России 27 июня 2018 г.

- Перечень технической и технологической документации, национальных стандартов и методических документов, необходимых для выполнения видов работ, установленных Положением о лицензировании деятельности по разработке и производству средств защиты конфиденциальной информации, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2012 г. N 171. Утвержден директором ФСТЭК России 12 августа 2020 г.
- Перечень технической документации, национальных стандартов и методических документов, необходимых для выполнения работ и оказания услуг, установленных положением о лицензировании деятельности по технической защите конфиденциальной информации, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 3 февраля 2012 г. N 79. Утвержден директором ФСТЭК России 12 августа 2020 г.

Как видно из перечисленного списка, перечни документов и оборудования не так давно были пересмотрены ФСТЭК России в связи с переработкой нормативной базы и ужесточения требований к лицензиатам, имеющим право оказывать услуги в области технической защиты конфиденциальной информации. Как следствие, учебным заведениям также необходимо учитывать данные изменения и иметь в лабораториях соответствующее оборудование для качественной подготовки кадров.

III. АТТЕСТАЦИЯ ПО ТРЕБОВАНИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ

С 1 июня 2021 года вступил в действие Приказ ФСТЭК России от 28 сентября 2020 года №110, утвердивший порядок организации и проведения работ по аттестации объектов информатизации на соответствие требованиям о защите информации. Данный документ заменил собой следующие нормативно-правовые акты:

- Положение по аттестации объектов информатизации по требованиям безопасности информации, утвержденное Гостехкомиссией России 25 ноября 1994 г.;
- ГОСТ Р 58189-2018 Защита информации. Требования к органам по аттестации объектов информатизации;
- ГОСТ РО 0043-003-2012 Защита информации. Аттестация объектов информатизации. Общие положения.

В соответствие с данным документом к органам по аттестации дополнительно ужесточаются требования в области отчетности по проведенным работам и срокам исполнения мероприятий по аттестации. Дополнительно указано о разрешении проведения аттестации объектов информатизации, принадлежащих федеральному органу государственной власти, органу государственной власти субъекта Российской Федерации, органу местного самоуправления, по решению руководителя данного органа собственными структурными подразделениями по защите информации с уведомлением ФСТЭК России и при наличии необходимых условий для проведения данных работ. Кроме того с вступлением в силу Приказа №110

создается реестр аттестованных объектов информатизации и, впервые, на портале ФСТЭК России опубликовали реестр органов по аттестации.

Публикация данного реестра дополнительно позволяет учебным заведениям наладить контакты с прямыми работодателями, на базе предприятий которых можно организовать базу для проведения производственных и преддипломных практик, рекомендовать выпускников для трудоустройства, а также иметь возможность привлечь в штат в качестве внешних совместителей представителей профильных организаций. Выписка [4] из реестра в части органов по аттестации региона Южного и Северо-Кавказского федеральных округов (ЮФО и СКФО) приведена в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. ПЕРЕЧЕНЬ ОРГАНОВ ПО АТТЕСТАЦИИ И ОРГАНОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ВЛАСТИ, ИМЕЮЩИХ ПРАВО ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ ПО АТТЕСТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАТИЗАЦИИ, В СООТВЕТСТВИИ С ПРИКАЗОМ ФСТЭК РОССИИ ОТ 28 СЕНТЯБРЯ 2020 Г. № 110

I. Органы по аттестации		
№ п/п	Наименование организации	Адрес места нахождения
1	ФГБОУ ВО «АГТУ»	414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16
2	Филиал Испытательный полигон АО «ГМКБ «Вымпел» им. И.И.Торопова»	416507, Астраханская область, г. Ахтубинск-7
3	МКУ «ГИЦ»	400074, г. Волгоград, ул. Бобруйская, д. 7
4	ЗАО «Контур-Сервис ТВ»	357500, Ставропольский край, г. Пятигорск, ул. Московская, д. 68а
5	ООО «Каскад»	357500, Ставропольский край, г. Пятигорск, ул. Московская, д. 68а
6	ООО «МТУ «Телеком-С»	355044, г. Ставрополь, проспект Кулакова, д. 5-1Г
7	ООО «АТЭК-С»	350080, Краснодарский край, г. Краснодар, Карасунский административный округ, ул. Заводская, д. 32, офис 203
8	ООО «Евромост-Защита»	350051, г. Краснодар, ул. Рашилевская, д. 325/1
9	ООО «Феникс»	350051, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Дальняя, д.39/3
10	Ростовский НТЦ ФГУП «НПП «Гамма»	344064, г. Ростов-на-Дону, ул. Вавилова, д. 54, Лит. А
11	С-КАВ ж.д. ОАО «РЖД»	344019, г. Ростов-на-Дону, Театральная пл., д. 4
12	ФГАНУ НИИ «Спецвузавтоматика»	344003, Ростовская обл., город Ростов-на-Дону, г. Ростов-на-Дону, ул. Города Волос, д. 6
13	АО «ВНИИ «Градиент»	344010, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, д. 96
14	ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»	344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, дом 130
15	ООО «ЦЗИ «СП-Крым»	299057, г. Севастополь, ул. Адмирала Фадеева, д. 48, пом. 8,9
16	Симферопольский НТЦ ФГУП «НПП «Гамма»	295017, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 34/2

II. Органы государственной власти		
№ п.п.	Наименование организации	Адрес места нахождения
1	Волгоградский филиал ФКУ ГЦИТОиС ФСИН России	400066, г. Волгоград, ул. Скосярева, д. 2А
2	ГУ МВД России по Волгоградской области	400066, г. Волгоград, ул. Краснознаменская, д. 17
3	ГУ МВД России по Краснодарскому краю	350020, г. Краснодар, ул. Гаврилова, д. 96
4	ГУ МВД России по Ростовской области	344082, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 29
5	ГУ МВД России по Ставропольскому краю	355035, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Дзержинского, дом 102
6	МВД по Кабардино-Балкарской Республике	360000, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, проспект Кулиева, д. 10
7	МВД по Карачаево-Черкесской Республике	369000, Карачаево - Черкесская Республика, г. Черкесск, ул. Ворошилова, д. 5
8	МВД по Республике Адыгея	385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Индустриальная, д. 2А/1
9	МВД по Республике Дагестан	367012, Республика Дагестан, г. Махачкала, проспект Р. Гамзатова, д. 7
10	МВД по Республике Калмыкия	358000, Республика Калмыкия, г. Элиста, ул. Пушкина, дом 4
11	МВД по Республике Крым	295034, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Богдана Хмельницкого, д. 4
12	МВД по Республике Северная Осетия-Алания	362019, Республика Северная Осетия-Алания, г. Владикавказ, ул. Пушкинская, д. 10 «Б»
13	ОТС-филиал РТУ РЭБОТИ (г. Ростов-на-Дону)	344019, г. Ростов-на-Дону, ул. Советская, д. 35/2
14	УМВД России по Астраханской области	414000, г. Астрахань. ул. Кирова, д. 5
15	УМВД России по г. Севастополю	299008, г. Севастополь, пл. Восставших, д. 6
16	УФК по Волгоградской области	400131, г. Волгоград, ул. Коммунистическая, дом 28А
17	УФК по Краснодарскому краю	350000, г. Краснодар, ул. Карасунская, д. 155
18	ФГКУ «ВЧ 6784 Северо-Кавказского округа войск национальной гвардии Российской Федерации»	364014, Чеченская Республика, г. Грозный, ул. Абузара Айдамирова 318
19	ФГКУ «Управление ЮО войск национальной гвардии»	344018, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, дом 163
20	ЦОУ ВОГОиП МВД России ГУ МВД России по СКФО	363720, Республика Северная Осетия - Алания, Моздокский район, г. Моздок, ст. Луковская, ул. Усанова, д. 6

Всего в стране на данный момент существует 359 органов по аттестации, имеющих право оказывать полный спектр услуг по защите информации, в частности право проведения работ по аттестации объектов, обрабатывающих сведения, составляющие государственную тайну и 126 органов государственной власти, имеющих аналогичные лицензии, но только для нужд собственного ведомства. Как видно из табл.4 на территории ЮФО и СКФО расположено не так много профильных организа-

ций, имеющих мощную методическую базу и соответственно интересных к сотрудничеству образовательным учреждениям.

IV. ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Вопросы повышения квалификации профессорско-преподавательского состава (ППС) и лиц, занимающихся защитой информации в организациях (предприятиях) являются актуальными и если на законодательном уровне данный вопрос достаточно хорошо проработан, на практике не всегда он совпадает с теорией.

Согласно части 5 статьи 47 Федерального закона от 29.12.2012 N 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» педагогические работники имеют право на дополнительное профессиональное образование по профилю педагогической деятельности не реже чем один раз в три года. Так же в части 1 статьи 48 педагогическому работнику внелено в обязанности систематически повышать свой профессиональный уровень. Одновременно, согласно статьи 196 «Трудового кодекса Российской Федерации» от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 28.06.2021), работодатель обязан проводить профессиональное обучение или дополнительное профессиональное образование работников, если это является условием выполнения работниками определенных видов деятельности.

Требование о повышении квалификации работников образования также было регламентировано профессиональным стандартом, но 1 июня 2020 г. Министр зарегистрировал Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 26.12.2019 N 832н «О признании утратившим силу приказа Министерства труда и социальной защиты РФ от 8 сентября 2015 г. №608н «Об утверждении профессионального стандарта «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования». Стандарт отменен без одновременного ввода замещающего документа и дата утверждения нового профстандарта пока неизвестна. Минобрнауки России поддержало отмену данного профстандарта в связи с необходимостью его доработки, так как, в частности, в соответствие с положениями данного стандарта возможность преподавания в магистратуре у лиц, не имеющих ученой степени, отсутствует, что накладывает ограничения на преподавание представителями профильных организаций.

Исходя из законодательства, учебные заведения должны обеспечивать ППС непрерывностью их образования непосредственно по профилю деятельности, но если внимательнее проанализировать документы о повышении квалификации сотрудников выпускающих кафедр, становится видно, что у большинства сотрудников имеются документы о прослушанных курсах в областях информационно-коммуникационных технологий общего профиля, инклюзивного образования, педагогической деятельности. Более того, в подавляющем большинстве эти курсы проходили на базе учебного заведения-работодателя, что говорит о большей формальности прохождения курсов, нежели о действительном повышении квалификации педагогического мастерства преподавателя.

Необходимо понимать, что между общими требованиями к наличию документа о повышении квалификации, уровню технических знаний и социокультурных

компетенций педагога в области информационной безопасности нужно учитывать динамику обновления материально-технической базы профильных предприятий, где придется работать выпускникам учебного заведения. И преподавательскому составу необходимо быть постоянно в курсе изменений нормативно-правовой базы и, как следствие, технической модернизации, что невозможно без повышения квалификации на базе ведущих организаций страны в области защиты информации, таких как:

- Негосударственное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования "Центр повышения квалификации специалистов по технической защите информации" (при ФАУ ГНИИ ПТЗИ ФСТЭК России), г. Воронеж.
- Частное учреждение дополнительного профессионального образования "Учебный центр "ЦБИ", г. Королев, Московская обл.
- Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования "Учебный центр "Информзащита", г. Москва.
- Некоммерческое образовательное учреждение "Учебный центр безопасности информации "МАСКОМ", г. Москва.
- Негосударственное образовательное частное учреждение дополнительного профессионального образования центр повышения квалификации "Учебный центр "ИнфоТеКС", г. Москва.
- Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования "Учебный центр "Эшелон", г. Москва.
- Некоммерческое образовательное учреждение дополнительного профессионального образования "Учебный центр безопасности информации "Сюртель", г. Москва.
- Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования "Лаборатория противодействия промышленному шпионажу", г. Санкт-Петербург.

Все перечисленные организации первоначально осуществляют практическую деятельность в области информационной безопасности и являются передовыми в своей области. Повышение квалификации сотрудников учебного заведения в данных организациях максимально благотворно скажется на динамике профессионального роста педагога. Единственный организационный вопрос с отправкой на такие курсы преподавателя состоит в том, что их оплату необходимо проводить за счет внебюджетных средств учебного заведения. Но, если рассматривать данный вопрос на перспективу и, в дальнейшем, предусмотреть открытие подобных курсов на базе учебного заведения с привлечением обученных преподавателей, то данные затраты довольно быстро окупятся.

При организации курсов повышения квалификации в области информационной безопасности на базе учебного заведения необходимо руководствоваться Приказом Министерства образования и науки РФ от 5 декабря 2013 г. №1310 "Об утверждении Порядка разработки дополнительных профессиональных программ, содержащих

сведения, составляющие государственную тайну, и дополнительных профессиональных программ в области информационной безопасности". Согласно данному Приказу, минимальный срок освоения программы профессиональной квалификации – 40 часов, программы переподготовки – 360 часов. Согласно данному Приказу программы переподготовки проходят обязательное согласование с ФСТЭК России или ФСБ России в зависимости от тематики курса.

Постановлением от 6 мая 2016 года N 399 Об организации повышения квалификации специалистов по защите информации и должностных лиц, ответственных за организацию защиты информации в органах государственной власти, органах местного самоуправления, организациях с государственным участием и организациях оборонно-промышленного комплекса реализованы Правила организации повышения квалификации специалистов по защите информации. В Постановлении указано, что примерные программы повышения квалификации и переподготовки разработаны ФСТЭК России в части технической защиты информации, противодействия иностранным техническим разведкам и обеспечения безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры. Отдельно отмечено об обязательном ограничении исключительно дистанционного обучения по данным образовательным курсам.

Разъяснение о получении и применении данных примерных программ дополнительного образования опубликовано в информационных сообщениях ФСТЭК России от 28 февраля 2018 года N 240/11/880 «О разработанных ФСТЭК России примерных программах профессиональной переподготовки и повышения квалификации специалистов в области противодействия иностранным техническим разведкам и технической защиты информации» и от 12 марта 2021 г. N 240/11/1119 «О рассмотрении проектов дополнительных профессиональных программ в области информационной безопасности, направленных образовательными организациями в ФСТЭК России на согласование».

В регионе ЮФО и СКФО на данный момент, согласно реестру ФСТЭК России, следующие учебные заведения (табл. 5) согласовали [5] программы дополнительного образования:

Программы повышения квалификации (ПК):

1) *Обеспечение безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных.*

2) *Техническая защита информации. Организация защиты информации ограниченного доступа, не содержащей сведения, составляющие государственную тайну.*

3) *Техническая защита информации. Способы и средства защиты информации от несанкционированного доступа.*

4) *Аттестация объектов информатизации по требованиям безопасности информации.*

5) *Техническая защита информации. Способы и средства защиты информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну, от утечки по техническим каналам.*

6) Техническая защита информации. Способы и средства защиты информации, не содержащей сведения, составляющие государственную тайну, от утечки по техническим каналам.

7) Техническая защита информации. Сертификация средств защиты информации по требованиям безопасности информации.

8) Техническая защита информации. Организация защиты информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну.

9) Противодействие иностранным техническим разведкам. Организация работ.

10) Противодействие иностранным техническим разведкам. Способы и средства.

11) Обеспечение безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры.

Программы профессиональной переподготовки (ПП):

1) Информационная безопасность. Техническая защита конфиденциальной информации.

2) Техническая защита информации ограниченного доступа, не содержащей сведения, составляющие государственную тайну.

ТАБЛИЦА 5. ПЕРЕЧЕНЬ ОРГАНИЗАЦИЙ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ, ИМЕЮЩИХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, СОГЛАСОВАННЫЕ С ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБОЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ И ЭКСПОРТНОМУ КОНТРОЛЮ

№ п/п	Наименование организации, осуществляющей образовательную деятельность	Наименование профессиональной программы
1.	Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Южная Софтвэрная Компания», г. Ростов-на-Дону	ПК: 1
2.	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»	ПК: 1, 2, 3 ПП: 1
3.	Управление Федерального казначейства по Волгоградской области	ПП: 2 ПК: 3,4,5,6
4.	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону	ПК: 1
5.	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет»	ПК: 1
6.	Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Учебный центр «Эксперт», г. Ростов-на-Дону	ПК: 1
7.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Пятигорск	ПК: 1
8.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь	ПК: 1,2,3 ПП: 1,2

№ п/п	Наименование организации, осуществляющей образовательную деятельность	Наименование профессиональной программы
9.	Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский социальный и институт», г. Ставрополь	ПК: 1
10	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный технический университет», г. Махачкала	ПК: 1,2,3,7
11	Негосударственное частное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Учебный центр «Персонал-Ресурс», г. Краснодар	ПК: 1,2
12	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чеченский государственный университет» Институт дополнительного профессионального образования, г. Грозный	ПК: 3
13	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный экономический университет», г. Ростов-на-Дону	ПК: 1
14	Частное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Ростовский центр повышения квалификации в области информационных технологий и связи», г. Ростов-на-Дону	ПК: 1,2,3,5,6,8,9,10
15	Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С.Нахимова», г. Севастополь	ПК: 1
16	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, г. Таганрог	ПК: 2,3 ПП: 2
17	Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный университет народного хозяйства», г. Махачкала	ПП: 2 ПК: 1,2,3,6,7
18	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный университет»	ПК: 3
19	Общество с ограниченной ответственностью «Эксперт-ТК», г. Керчь	ПК: 1
20	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар	ПП: 2 ПК: 2,3,6,11
21	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет»	ПП: 1

Для предприятий, оказывающих услуги по защите информации с целью выполнения лицензионных требований обязательно наличие руководителя и минимум двух сотрудников, имеющих профильное образование, либо иное образование и курсы профессиональной переподготовки, а также повышение квалификации по заявленным видам деятельности. Обязательное повышение квалификации сотрудникам не раз же одного раза в 5 лет регламентировано Постановлением Правительства РФ от 3 февраля 2012 г. N 79 «О лицензировании деятельности по технической защите конфиденциальной информации».

Для организаций, являющихся владельцами значимых объектов критической информационной инфраструктуры согласно Приказу ФСТЭК России от 21.12.2017 N 235 (ред. от 27.03.2019) "Об утверждении Требований к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования" также предъявляются требования к сотрудникам структурного подразделения по безопасности. П.12 Приказа устанавливает обязательное наличие у руководителя подразделения по безопасности и штатных сотрудников документа, подтверждающего прохождение обучения по курсам направления «Информационная безопасность» со сроком обучения не менее 72 часов. Более того этим же Приказом устанавливается требование об обязательном прохождении курсов повышения квалификации всеми штатными сотрудниками не реже одного раза в 5 лет.

Необходимо отметить, что на данный момент в регионе ЮФО и СКФО ни одно учебное заведение не согласовало курсы по переподготовке по направлению обеспечения безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры и только «Кубанский государственный технологический университет» согласовал программу повышения квалификации по данному направлению, которое исходя из требований 235 Приказа ФСТЭК России будет в обозримом будущем довольно востребовано владельцами значимых объектов критической информационной инфраструктуры.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, хотелось бы отметить, что на законодательном уровне идет активная проработка вопросов обеспечения образовательного процесса подготовки специалистов в области информационной безопасности. Разрабатываются новые программы подготовки специалистов в условиях появления новых угроз безопасности и постоянно меняющихся правил ведения информационного обмена в мире. Регион ЮФО и СКФО, как видно из приведенного в статье анализа, выдает довольно хорошие показатели по возможностям получения профильного образования и курсов дополнительного образования.

При этом, на рынке труда все равно ощущается нехватка квалифицированных кадров, как в качестве специалистов обеспечения информационной безопасности, так и высококвалифицированным преподавателей, способных представлять слушателям актуальный учебный материал, соответствующий действующему законодательству и методикам выполнения специальных работ.

С целью актуализации образовательного процесса в статье предлагается особое внимание уделять постоянной работе над учебными программами, дополняя их параллельно с введением новых стандартов и специальных нормативно-правовых актов в области защиты информации. Также необходимо совершенствовать материально-техническое обеспечение профильных кафедр и обеспечивать преподавателей непрерывным обучением на курсах повышения квалификации в учебных заведениях профилирующей направленности. С этими целями необходимо налаживать сотрудничество с предприятиями, оказывающими услуги по защите информации в области информационного обмена и проведения периодических стажировок студентов и профессорско-преподавательского состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 г. №646 – URL: <https://rg.ru/2016/12/06/doktrina-infobezbasnosti-dok.html> (дата обращения 26.06.2021).
2. Реестр профессиональных стандартов – URL: <https://profstandart.rosmintrud.ru/obschchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/reestr-professionalnykh-standartov/> (дата обращения: 26.06.2021).
3. Реестр организаций, осуществляющих образовательную деятельность по имеющим государственную аккредитацию образовательным программам – URL: <http://obrnadzor.gov.ru/otkrytoe-pravitelstvo/opendata/7701537808-raoo/> (дата обращения: 26.06.2021).
4. Перечень органов по аттестации – URL: <https://fstec.ru/tehnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty-po-sertifikatsii/153-sistema-sertifikatsii/590-perechen-organov-po-attestatsii-n-ross-ru-0001-01bi00> (дата обращения: 26.06.2021).
5. Перечень организаций, осуществляющих образовательную деятельность, имеющих дополнительные профессиональные программы в области информационной безопасности, согласованные с Федеральной службой по техническому и экспортному контролю. – URL: <https://fstec.ru/tehnicheskaya-zashchita-informatsii/obuchenie-spetsialistov/12-perechen-obrazovatelnykh-uchrezhdenij> (дата обращения: 26.06.2021).

Использование технологии OPC UA при исследовании компьютерных моделей объектов управления в образовательном процессе

Крылова Елена Львовна

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
lenakryl@gmail.com

Немудрук Максим Леонидович

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
netomax@mail.ru

Федоров Михаил Степанович

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
mfed.sibur@gmail.com

Новожилов Игорь Михайлович

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
novozhilovim@list.ru

Щуров Дмитрий Александрович

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
dima2735612@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается новая технология OPC UA и ее использование при изучении микропроцессорных средств автоматизации с применением компьютерных моделей объектов управления. Рассматривается применение виртуального объекта управления. Управление компьютерной моделью с помощью промышленного контроллера.

Annotation. A new technology OPC UA and its use in the study of microprocessor automation tools using computer models of control objects are considered.

Ключевые слова: OPC UA; модели; виртуальная лаборатория.

Keywords: OPC UA; models; virtual laboratory.

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире все чаще для проведения экспериментов используют модели объектов управления (ОУ), симулируемые компьютерными программами. Они могут находить применение в процессе разработки системы управления моделируемого объекта и в процессе обучения как производственного персонала [1], так и для организации образовательного процесса для закрепления полученных знаний и расширения доступной для обучения номенклатуры объектов управления. Важным моментом является то, что для организации связи модели с управляющим оборудованием предлагается использовать промышленный протокол связи.

A. Промышленные протоколы

Существует множество протоколов и стандартов как открытых, так и проприетарных позволяющих обмениваться информацией между элементами системы управления разных производителей, например:

- Profibus DP.
- Modbus.

- OPC DA (OPC COM).
- OPC UA.

Первые два протокола – это, прежде всего, протоколы полевого уровня, предназначенные для построения распределенной системы управления в ее классическом понимании. Их задача – организовать обмен между компонентами системы на полевом уровне: контроллерами, устройствами ввода/вывода, интеллектуальными устройствами. Однако при выходе с полевого уровня на уровень человека-машины интерфейса очень быстро возникла потребность в унификации способов взаимодействия. Первой попыткой ее решить была спецификация OPC DA, ставшая значительным шагом вперед в деле организации связи в распределенных АСУ ТП, но привязанность к технологиям Windows ограничивало область ее применения. Следующим шагом на этом пути стала спецификация OPC UA, которая не привязана к решениям одного единственного производителя и на данный момент претендует на роль универсального средства организации информационного взаимодействия для современных систем управления. В связи с этим остановимся на последнем из них, как наиболее универсальном, подробнее.

B. Стандарт OPC UA

OPC UA – программный интерфейс для промышленного протокола связи и модели данных. OPC UA используется для связи между конечными устройствами (например, ПЛК, промышленными ПК, системами управления технологическими процессами) различных производителей по принципу клиент/сервер. С помощью OPC UA любой тип информации может быть доступен в любое время и в любом месте.

OPC UA устраняет разрыв между миром ИТ на базе IP и промышленными сетями. Больше не нужно использовать интерфейсы и шлюзы, которые всегда приводят к

потере или искажению информации. Теперь все данные производственного процесса могут передаваться по единому протоколу: внутри системы управления, между контроллерами или между контроллером и облачной базой данных, или между контроллером и компьютерной моделью объекта управления. OPC UA может устранить необходимость в традиционных полевых шинах. А возможность взаимодействовать с симулятором объекта управления дает новые возможности не только в управлении производственным процессом, но и в образовательной области.



Рис. 1. Промышленный интернет вещей. Переход от иерархической структуры к однородной

Информационная модель OPC UA обеспечивает семантическое описание данных и их контекста, что позволяет и машине, и человеку корректно интерпретировать полученные данные.

Для архитектуры OPC UA разработаны методы, которые позволяют аппаратным ресурсам напрямую взаимодействовать между собой. Машины могут опрашивать друг друга, чтобы получить информацию о доступных службах, интерфейсах и функциональных возможностях. Это повышает автономность и эффективность их взаимодействия.

До настоящего времени в архитектуре OPC UA использовалась модель связи клиент/сервер: клиент запрашивает информацию и получает ответ от сервера. Эта модель имеет ряд ограничений при работе в сетях с большим количеством узлов. Поэтому было принято решение дополнить стандарт OPC UA моделью связи издатель/подписчик (pub/sub). Она обеспечивает связь от одного ко многим и от многих ко многим. Сервер отправляет свои данные в сеть (публикация) и каждый клиент может получить эти данные (подписка) [2].

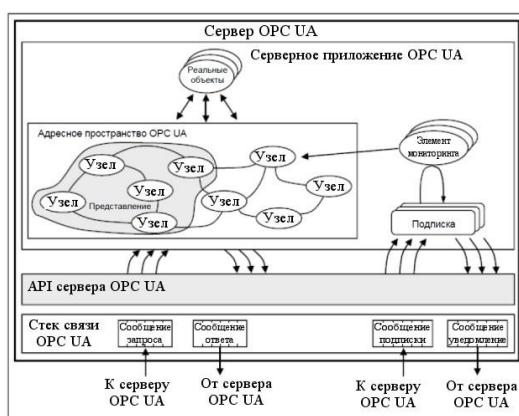


Рис. 2. Архитектура сервера OPC UA

Информационная модель – описание узла обеспечивает детальную информацию об узле, включая:

- наименование и описание;
- тип данных;
- время фиксации значения;
- уровни доступа;
- частота изменения.

OPC UA разработана как путь перехода для клиентов и серверов OPC, основанных на технологии Microsoft COM.

Технология OPC COM имела ряд недостатков:

- доступность только на операционных системах семейства Microsoft Windows;
- закрытая технология DCOM;
- сложность конфигурирования, связанная с DCOM;
- неприспособленность DCOM для обмена данными через интернет;
- неприспособленность DCOM для обеспечения информационной безопасности (шифрование) [3].

При разработке OPC UA были предприняты меры предосторожности, чтобы существующие данные, предоставляемые COM-серверами OPC (DA, HDA и A&E), могли быть легко сопоставлены и отображены через OPC UA. Поставщики могут по своему усмотрению перенести свои продукты в OPC UA или использовать внешние оболочки для преобразования из OPC COM в OPC UA и наоборот.

C. Технология OPC UA TSN

Однако архитектура OPC UA имеет ряд серьезных ограничений в отношении таких сложных задач, как обеспечение функциональной безопасности, управление движением или связь в режиме в реального времени. Реализация модели издатель/подписчик и интеграция стандартов Time-Sensitive Networking (TSN) обеспечили поддержку стандартом OPC UA режима реального времени [4].



Рис. 3. OPC UA и TSN в модели OSI

OPC UA TSN или OPC UA over TSN – технология передачи данных в режиме реального времени, объединяющая два стандарта: спецификация OPC UA определяет передачу данных в промышленных сетях, а технология TSN описывает работу сетей, требующих строгой синхронизации времени и детерминированной доставки данных.

Используя эти стандарты в совокупности, можно обеспечить взаимодействие между устройствами разных производителей в режиме реального времени, а также объединить информационные (ИТ) и операционные (ОТ) системы предприятия.

Синхронизация времени является критически важным аспектом промышленной связи в приложениях управления движением, технического зрения или при связи между контроллерами. Стандарт Ethernet не подразумевает детерминированную доставку данных, поэтому все полевые шины, представленные на рынке, имеют собственные механизмы передачи данных в реальном времени. Пакет стандартов TSN описывает коммуникацию в реальном времени в соответствии со стандартом IEEE 802 Ethernet, превращая его в унифицированный стандарт, отвечающий всем нуждам промышленной автоматизации.

II. ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

При внедрении использовался лабораторный стенд, состоящий из ПЛК B&R PP065 со встроенным сервером OPC UA и ПК, на котором запущена виртуальная 3D-модель объекта управления. Связь между ними производится по внутренней сети Ethernet.

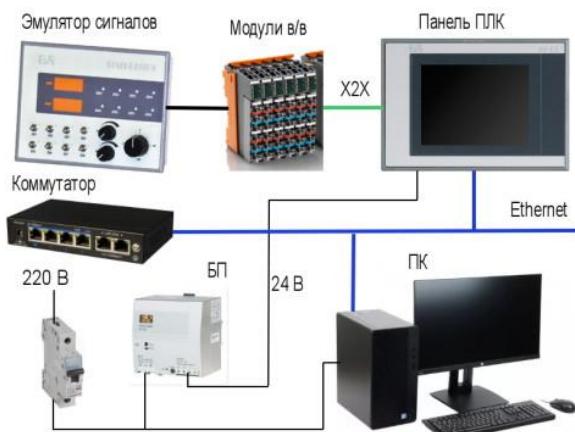


Рис. 4. Лабораторный стенд

Любой контроллер B&R может выполнять функции сервера или клиента OPC UA. Это обеспечивает вертикальную связь с системами SCADA, MES и ERP, а также независимую от производителя связь между контроллерами.

Для внедрения функций OPC UA используются функциональные блоки PLCopen, более 20 функциональных блоков в библиотеке B&R AsOpcUas.

В качестве ОУ используется 3D-модель резервуара (емкости) в программе FACTORY I/O. Емкость является упрощённой моделью различных физических объектов:

- стиральная машина;
- бойлер;
- водонапорная башня;
- нефтяной резервуар.

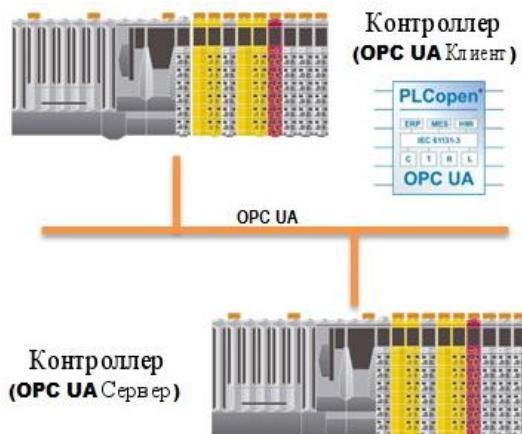


Рис. 5. Связь ПЛК B&R

FACTORY I/O представляет собой интерактивную изолированную среду для обучения технологиям автоматизации на базе ПЛК, в которой пользователь может строить и симулировать в реальном времени промышленные технологические системы и использовать их с аппаратными или программными ПЛК [9]. Поскольку FACTORY I/O позволяет пользователю не только имитировать работу технических объектов на экране компьютера, но и самостоятельно создавать их, предусмотрена работа программы в двух режимах – режим редактирования и режим исполнения.

В качестве другого варианта объекта управления может применяться инструмент Scene Viewer от B&R который использует предоставленные САПР данные для визуализации движений в 3D.



Рис. 6. Связь ПЛК и Scene Viewer

С помощью B&R Scene Viewer модели механики роботов можно легко создавать, а движения роботов можно отображать и записывать без какого-либо реального оборудования. Инструмент имеет интегрированный физический движок, который обеспечивает приблизительное моделирование физических систем с упором на производительность в реальном времени. Именно такой тип системы теперь позволяет моделировать целые машины и установки. Можно проверить их поведение в реальном времени и системную нагрузку на целевое оборудование в среде аппаратного обеспечения в цикле.

Обучающемуся это позволяет познакомиться с азами и особенностями управления различным технологическим оборудованием. Отработать приемы управления им. Изучить особенности применения современного контроллерного оборудования.

III. ПРИМЕРЫ РАБОТ

A. Моделирование процессов налива, нагрева и слива из емкости.

В среде разработки B&R AUTOMATION STUDIO разрабатывается программа управления, объявляются переменные процесса, настраивается сервер OPC UA, описывается логика с использованием одного из специализированных или стандартных языков программирования, поддерживаемых средой разработки. Полученная программа загружается в ПЛК.

В 3D-модели открываются переменные сервера OPC UA и устанавливается соответствие с переменными модели объекта.

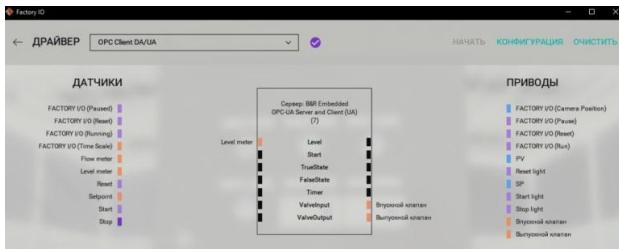


Рис. 7. Настройка связи модели с контроллером

При запуске модели происходит отправка управляющих команд в интерфейсе программы. Логика ПЛК осуществляет процесс налива и слива в автоматическом режиме.



Рис. 8. 3D-модель емкости

В качестве моделей могут использоваться и более сложные системы, например Matlab, которые позволят описать более сложную логику процессов.

B. Робот манипулятор

Могут применяться специализированные инструменты позволяющие создавать двойники физических объектов управления. Например таких как робот-манипулятор. Причем возможно применение как готовых моделей объектов из библиотек так и конструирование собственных из примитивов средствами специализированного конструктора.

Современные инструменты моделирования упрощают создание цифровых двойников. Это не только упрощает и ускоряет разработку оборудования и программного обеспечения, но также позволяет выполнять виртуальный ввод в эксплуатацию. Этот момент является очень важным с точки зрения применения двойников в учебном процессе. Применение двойников помогает обучить студентов созданию систем управления робототехническими агрегатами без необходимости доступа к

дорогостоящему оборудованию. Тестирование, выполняемое во время управления виртуальным роботом-манипулятором, может варьироваться от простых логических последовательностей до сложных критических сценариев для обеспечения общей эффективности и качества аппаратного и программного обеспечения машины. Использование цифрового двойника значительно упрощает процесс обучения.

Устойчивая тенденция к комплексным решениям создает основу для реализации концепций Индустрии 4.0. Интеграция робототехники и автоматизации также означает, что для разработки, диагностики и обслуживания потребуется только один контроллер и одна инженерная система.

Удобное программирование - еще одно решающее преимущество, которое дает сочетание робототехники с управлением машиной. Вместо программирования приложения робототехники в одной среде разработки и машинного приложения в другой будет только одно приложение и одна среда разработки. Это поможет сосредоточиться на решении конкретной технологической задачи и повысит универсальность приобретенных студентом знаний и сократить время необходимое для обучения.



Рис. 9. 3D-модель робота манипулятора

Можно использовать готовые библиотечные модели роботов манипуляторов в качестве объектов управления. Пример такой модели показан на рис.9. Либо пользуясь возможностями программного обеспечения из комплекта разработчика создавать управляющее программное обеспечение. На рис. 10 показан пример модели созданной из простых элементов в конструкторе. Для разработки управляющей программы применяется лабораторный стенд показанный на рис. 4. На рис. 11 показано связывание переменных 3D модели и контроллера.

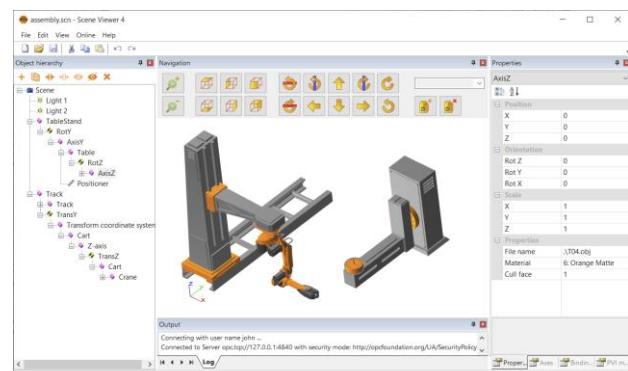


Рис. 10. Интерфейс программы создания управляемой 3D модели

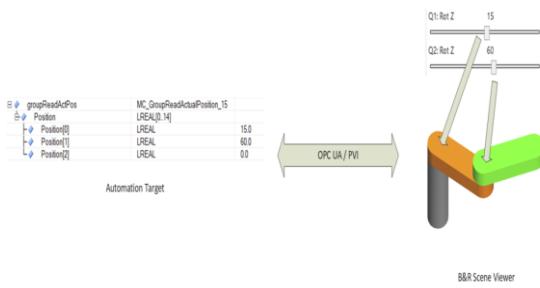


Рис. 11. Связывание ПО ПЛК и кинематической модели с помощью OPC UA

Объекты в сцене являются параметрическими – их свойства могут быть изменены либо элементами графического интерфейса пользователя в визуализации, либо программно через прикладную программу из цепи автоматизации. То есть посредством ПО исполняемого на лабораторном стенде. Такое изменение свойств имеет немедленный эффект и, следовательно, визуализирует связанный процесс в процессе исполнения управляющего ПО.

Важным аспектом применяемой технологии является шифрование каналов связи между устройствами.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология OPC UA является перспективным направлением для систем ПoT. Ее использование в учебном процессе позволит обучающимся не только ознакомиться с этой успешно развивающейся технологией, но и освоить применение полунаатурного моделирования для разработки систем управления. Отдельно стоит отметить, что использование подхода позволит исследовать модели объектов управления созданные в различных средах моделирования таких, например как MatLab. Это может позволить сделать процесс освоения материалов других смежных дисциплин более наглядным

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Уткин М.А., Федоров М.С., Жеронкин К.М., Нибур С.А. Моделирование технологических операций для тренажера перевалки сжиженных углеводородных газов. // Труды 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). – Т. 2 – М.: ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 2015. – С. 385-399.
- Часто задаваемые вопросы по технологии OPC UA over TSN. – Интернет-сайт. – URL: <https://www.br-automation.com/ru/tekhnologija/opc-ua/chasto-zadavaemye-voprosy-po-tehnologii-opc-ua-over-tsn/> (дата обращения: 15.06.2021).
- Спецификация OPC UA [Электронный ресурс]. – Интернет-сайт. – URL: https://bookasutp.ru/Chapter9_2_4.aspx/ (дата обращения: 15.06.2021).
- OPC UA over TSN [Электронный ресурс]. – Интернет-сайт. – URL: <https://www.br-automation.com/ru/tekhnologija/opc-ua/opc-ua-over-tsn-dlja-upravlenija-dvizheniem-funktionalnoi-bezopasnosti-i-raboty-v-rezhime-realnogo-vremeni/> (дата обращения: 15.06.2021).
- OPC UA. – Интернет-сайт. – URL: <https://www.br-automation.com/ru/technologies/opc-ua/> (дата обращения: 15.06.2021).
- Unified Architecture. – Интернет-сайт. – URL: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/> (дата обращения: 15.06.2021).
- OPC UA. – Интернет-сайт. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/OPC_UA (дата обращения: 15.06.2021).
- OPC UA TSN. – Интернет-сайт. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/OPC_UA_TSN/ (дата обращения: 15.06.2021).
- Factory I/O. – Интернет-сайт. – URL: <https://docs.factoryio.com/> (дата обращения: 15.06.2021).
- OPC Unified Architecture. – Интернет-сайт. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/OPC_Unified_Architecture/ (дата обращения: 15.06.2021).
- ПНСТ 448-2020 Умное производство. Унифицированная архитектура OPC. Часть 1. Общие положения. – Интернет-сайт. – URL: <https://normacs.net/Doclist/doc/12LCT.html/> (дата обращения: 15.06.2021).
- Тимаев А.А. Промышленные сети: учеб. пособие: – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 124 с.

Возможности образовательных технологий в перспективе развития саморегуляции студентов

Эксакусто Татьяна Валентиновна
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
exakusto@sfedu.ru

Аннотация. Изучена саморегуляция студентов до и после проведения занятий с использованием интерактивных и метапредметных образовательных технологий. Саморегуляция у преобладающего большинства у студентов до проведения занятий соответствует среднему и низкому уровню. Применение интерактивных и метапредметных технологий в процессе образовательной деятельности показало наличие достоверных различий в количественном соотношении студентов в группах с разным уровнем саморегуляции: увеличилось количество студентов с высоким уровнем и уменьшилось с низким уровнем саморегуляции.

Annotation. A self-regulation of students before and after classes using interactive and metasubjective educational technologies has been studied. Self-regulation in the overwhelming majority of students before classes corresponds to the average and low level. The use of interactive and metasubjective technologies in the process of educational activities showed that the number of students with a high level of self-regulation increased and decreased with a low level of self-regulation.

Ключевые слова: саморегуляция, волевой самоконтроль, интерактивно-коммуникативные технологии, метапредметные технологии, студенты.

Keywords: self-regulation, volitional self-control, interactive-communication technologies, metasubject technologies, students.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная Россия ориентирована на создание развитого индустриального сектора, способного обеспечить активный рост экономики страны, а современный специалист должен быть максимально включен в решение задач быстрого экономического развития, создание высокоразвитой экономики. Прежде всего, эти требования обращены к инженерам и молодым специалистам – выпускникам технических вузов. Анализ требований к современному инженеру, ИТ-специалисту показал, что, помимо владения современными профессиональными технологиями, от них ожидается владение способностью к опережающей креативности, быстрой адаптации к меняющимся условиям, обладание навыками саморегуляции, развитым волевым самоконтролем [1, 2]. В свете современных тенденций экономического, социального развития нашего общества современная система российского высшего образования ставит своей целью подготовку высококвалифицированного работника, конкурентоспособного на рынке труда, готового к постоянному профессиональному росту, решению нестандартных задач в условиях дефицита времени и информации, принятию решений, выбору адекватных стратегий преодоления трудных ситуаций и т.д. [2, 3]. Именно поэтому особое внимание в процессе обучения должно уделяться развитию навыков самоорганизации, саморазвития, волевого самоконтроля и саморегуляции.

Анализ проблемы саморегуляции позволяет выделить три основных подхода к ее пониманию: психофизиологический (П.К. Анохин, Л.Г. Дикая, А.О. Прохоров, Ю.И. Александров и др.), системно-деятельностный (О.А. Конопкин, Ю.А. Миславский) и личностно-ориентированный подходы (К.А. Абульханова-Славская, В.И. Моросанова, А.К. Осницкий, Г.С. Прягин, Е.А. Сергиенко). Наибольший интерес в контексте развития саморегуляции у студентов в образовательном процессе представляет личностно-ориентированный подход, где саморегуляция понимается как целостная система выдвижения и управления достижением целей поведения и деятельности. Саморегуляция позволяет субъекту мобилизовать свои личностные и когнитивные возможности, выступающие своеобразными ресурсами для реализации собственной активности. Благодаря саморегуляции человек исследует ситуацию, выстраивает программу поведения в ней, контролирует и корректирует результаты. По мнению В. И. Моросановой, предметом психологии саморегуляции являются интегративные психические процессы и явления, которые обеспечивают самоорганизацию различных видов психической активности человека, целостность его индивидуальности и личности [4]. Обобщая исследования по проблеме саморегуляции, можно сделать несколько выводов:

a) возможны различные индивидуальные стили саморегуляции, обусловленные индивидуальными особенностями протекания регуляторных процессов планирования, программирования, моделирования, оценивания результатов своей деятельности [4];

b) саморегуляция отражает способность субъекта к организации собственной активности: ее мобилизации, направления, согласования с объективными требованиями и активностью других людей [5, 6];

c) она является системной характеристикой, поскольку проявляется на всех уровнях: физиологическом, психофизиологическом, психологическом, социально-психологическом; при этом она может быть осознанная/произвольная и неосознаваемая/непроизвольная [6];

d) основными характеристиками саморегуляции выступают целенаправленность (для достижения поставленной цели мобилизируются внутренние ресурсы); осознанность (сознательное воздействие человека на осуществляющую им деятельность и поведение); устойчивость, пластичность, адекватность и надежность, раскрывающие внутренние резервы человека [7];

e) выделяют различные виды саморегуляции: волевую (сознательное управление собой и своей деятельностью, руководствуясь определенными побуждениями и целями), эмоциональную (умение контролировать и регулировать внутреннее состояние и реакции, ведущие к эмоциональной устойчивости), произвольную (системно организованный процесс внутренней активности человека, направленный на стимулирование, поддержание и управление произвольной активности); мотивационную (способность человека принимать или отвергать внешние или внутренние побуждения), интеллектуальную (способность овладеть собой и своим поведением на основе интеллектуальной деятельности) [4];

f) саморегуляция оказывает влияние на успешность как различных видов деятельности: учебной, профессиональной, трудовой, так и на успешность личности в целом.

По данным различных исследований саморегуляция коррелирует со множеством переменных как личностных, так и социально-психологических. Эффективность саморегуляции повышается с ростом уверенности, устойчивости в достижении цели, применения стратегий лидерства [8], с развитием самосознания, с ростом умения анализировать эмоции, чувства и мотивы поведения (собственные и других людей). Обнаружено также, что люди, у которых на высоком уровне находятся планирование, моделирование, программирование, оценивание результатов своей деятельности, характеризуются большей самостоятельностью, умением гибко и адекватно реагировать на изменения условий деятельности, способностью уверенно чувствовать себя в незнакомых ситуациях [9]. Данные по саморегуляции проявлений лени показывают, что ленивым сложнее планировать и контролировать свою деятельность. С возрастанием самоконтроля над ленью повышается эффективность учебной деятельности [10].

Саморегуляция, рассматриваемая в рамках личностно-ориентированного подхода тесно связана с волевым самоконтролем, составляя его основу. Волевой самоконтроль (ВСК) представляет собой особый уровень регуляции, реализующий оптимальные индивидуальные ресурсы человека, представляющий адекватное для каждой определенной ситуации соответствие внешних целей и внутренних возможностей [11]. Волевой самоконтроль выражается в способности управлять эмоциями и настроением, характеризуется общей личностной зрелостью и адекватностью поведения, является важным условием профессиональной успешности [12]. Для людей с высоким уровнем волевого самоконтроля характерен высокий уровень способности к самоуправлению, уверенности в себе, самооценки и низкий уровень тревожности [12].

Таким образом, теоретический анализ по проблеме саморегуляции позволяет заключить, что способность человека к постановке целей, их достижение, реализация жизненных планов, гармония планов и целей, ценностей и смыслов, контроль над результатами действий, являются важнейшими переменными с точки зрения достижения личностной и профессиональной успешности, что приводит к необходимости мониторинга и развития саморегуляции студентов инженерных специальностей в образовательном процессе.

Развитие саморегуляции в процессе обучения студентов возможно в условиях применения специальных образовательных технологий. Условно такие технологии можно разделить на интерактивно-коммуникативные и метапредметные. Что касается интерактивно-коммуникативных технологий, то они широко используются в образовательном процессе в системе высшего образования. Эти технологии, во-первых, отличаются динамичностью, активностью (с точки зрения вовлечения в образовательный процесс студентов), мотивационной составляющей (вызывают интерес студентов инженерных специальностей к коммуникативным процессам, групповому взаимодействию, мотивируют их на получение гуманитарной информации). Во-вторых, для этих технологий характерен уход от монологичности, директивности в позиции преподаватель-студент (когда информация поступает со стороны педагога, а студенты выступают своего рода «объектами» приема информационных потоков). В-третьих, интерактивно-коммуникативные технологии повышают наглядность и облегчают восприятие материала студентами, что особенно важно для студентов технических (инженерных) специальностей, т.к. зачастую, информация гуманитарного характера воспринимается ими достаточно тяжело.

Использование интерактивных методов обучения предусматривает моделирование жизненных ситуаций, совместное решение проблем и т.п. Суть интерактивного обучения состоит в том, чтобы все студенты оказались вовлеченными в процесс познания и имели возможность понимать и осознавать свои чувства, переживания, стратегии и паттерны поведения (что очень важно для волевого самоконтроля и саморегуляции), а также ситуативные условия, которые моделируются в учебном процессе. К интерактивно-коммуникативным технологиям относят:

1) *групповую дискуссию*, которая предполагает, прежде всего, спонтанный, жестко не структурированный характер ведения обучения, отсутствие директивности поведения преподавателя;

2) *квест* – особая игровая форма обучающего процесса, в рамках которой участники последовательно решают определенные психологические задачи для достижения целей командного взаимодействия, снижения психологической дистанции, развитие доверия, сплоченности (через срабатываемость) и т.п.;

3) *деловые игры* как метод моделирования реальной социальной ситуации, который способствует развитию навыков совместной деятельности, сотрудничества в ходе принятия группового решения;

4) *мозговой штурм и анти-брейнштурминг (обратный мозговой штурм)* – методы решения проблемы на основе стимулирования творческой активности, при котором участникам обсуждения предлагают высказывать как можно большее количество вариантов решения задачи;

5) *кейсы* представляют собой анализ конкретных ситуаций с заданными условиями;

6) *тренинговые технологии* – совокупность различных приемов и способов организации активности личности, форма интерактивного обучения с целью осуществления изменений в ее поведения, развития личностной, коммуникативной, профессиональной компетентности;

7) *Science Slam* – технология, которая представляет собой публичное выступление (мини-лекцию) студента (молодые исследователи), который должен рассказать в доступной, интересной (и порой в юмористической) форме о своем исследовании.

Эти технологии хорошо зарекомендовали себя, что подтверждается позитивными сдвигами в интеллектуально-личностных, социально-психологических ресурсах студентов Института компьютерных технологий и информационной безопасности ЮФУ [13].

Гораздо менее представленными в образовательном процессе являются метапредметные технологии. Целью метапредметного образования является не просто освоение учебной деятельности, а генерация и продуцирование такого образовательного результата, который имеет ценность и для обучающегося, и для окружающего его мира [13]. Метапредметные технологии представляют собой особые педагогические способы работы с мышлением, коммуникацией, действием, пониманием и рефлексией обучающихся. Они способствуют формированию знаний через развитие собственной рефлексивной позиции, собственный опыт, волевой самоконтроль и саморегуляцию; они снимают чувство страха, боязни перед неправильным ответом (т.к. многие методы построены на выборе ответа не путем зазубривания знаний, а правильного их усвоения, генерации, запоминания и воспроизведения). Остановимся на некоторых из них.

Техника «Противодействие прокрастинации»

Эта техника позволяет избежать «откладывание» важного дела, отвлекаясь на бытовые мелочи. Прокрастинация возникает в том случае, когда человеку необходимо выполнить какое-либо важное дело, которое ему не нравится. Это очень часто характерно для студентов, которые, сталкиваясь с необходимостью выполнять задания по всем учебным предметам не всегда готовы к выполнению отдельных заданий, которые им не интересны или кажутся не важными (например, это наблюдается при выполнении заданий по психологии студентами инженерных направлений подготовки). Соответственно необходимость выполнения таких заданий приводит к активизации неприятных, дискомфортных ощущений, поэтому сознание условно «пытается прекратить» подобную отрицательную стимуляцию, переключая внимание человека на что-то другое, что приносит более комфортные ощущения (выпить чашку кофе, навести порядок на столе, ответить на сообщение мес-

сенджера, проверить почту и т.п.). Противодействовать прокрастинации можно при помощи волевой регуляции, используя, например, технику «Pomodoro». Суть этой техники заключается в том, что, направляя волевой самоконтроль на выполнение задания, человек в течение 25 минут (для этого устанавливается таймер) концентрируется на его выполнении, не отвлекаясь ни на что другое. После этого временного периода необходимо отвлечься на какое-либо вознаграждение для себя: несколько минут в социальных сетях, чашка кофе, кусочек шоколада и т.п. (не более 10 мин.). Обнаружено [14], что подсознательный дискомфорт исчезает по истечению некоторого времени с того момента, как человек начинает работать над нелюбимым делом. Таким образом периоды отдыха и релаксации способствуют развитию волевого самоконтроля и саморегуляции и выполнению необходимых, но не очень приятных дел.

Техника «Ментальная карта»

Эта техника может использоваться для развития какой-либо идеи, разработки плана, для создания множества вариантов решения сложной задачи, развития креативного мышления. По мнению Д. Грей-Грант, все это требует определенного режима работы, который она называет «рассеянным» [15]. При этом она отмечает, что самая большая ошибка, которую делают многие люди – они пишут, создают, генерируют идеи в сфокусированном режиме. Нужно отметить, что так называемый рассеянный режим, это особый стиль мыслительной деятельности, когда человек записывает все, что приходит ему в голову относительно разрабатываемой идеи. При этом не допустимы критические замечания в свой адрес («преподавателю это не понравится», «это написано плохо и не понятно» и т.п.), перечитывание, исправление текста и т.п. Такой подход можно назвать креативным или «пишущим» режимом, поскольку он не ограничивает человека и не загоняет его в рамки самокритики. Только после того, как человек отработает в «рассеянном» режиме (например, 25–30 минут), допустимо переходить в сфокусированный режим, который является режимом редактирования и позволяет вычитывать написанное, править и дорабатывать текст. Одной из техник, которая позволяет людям «включить» рассеянный режим, является использование ментальных карт. Для создания ментальной карты, известной также под названием «клUSTERизация», берут лист бумаги, кладут его горизонтально. Горизонтальное положение бумаги условно позволяет двигаться в любом направлении, снимая барьеры и ограничения, создавая новые связи между понятиями, символами, идеями. В центре листа записывается тема/условие/понятие, то, что является отправной точкой для разработки новых идей. Эта тема обводится в круг, затем важно не останавливаясь записывать все, что приходит в голову, не обдумывая и не критикуя. Такая ментальная карта может использоваться и для запоминания важной информации. Например, когда студент читает учебник, изучает лекцию, после прочтения можно создать такую карту и записывать все, что вспоминается в связи с изучаемой темой.

Техника «Повторение с интервалами»

Эта техника заключается в повторении того, что человек (студент) хочет сохранить в памяти, но между повторениями должны быть интервалы. После прочте-

ния материала необходимо отложить книгу/лекцию и проверить, что из прочитанного только что материала, возможно вспомнить. При этом важно повторять новые понятия или техники решения задач на протяжении нескольких дней. Растигивание повторений на несколько дней существенно помогает запоминанию. Исследования показали, например, что попытка запомнить информацию, повторив ее 20 раз подряд за один вечер, не настолько эффективна как повторение той же самой информации двадцать раз, но растянутое по времени в течение нескольких дней. Для выполнения этой техники также необходима определенная волевая регуляция, поскольку, например, для подготовки к экзамену требуется не один-два дня, а неделя, в течение которой, студент будет повторять определенный объем информации.

Техника воспроизведения информации

Способность вспоминать – генерировать идеи изнутри себя – является одним из ключевых показателей хорошего обучения. Техника заключается в следующем: прочитав страницу, важно отвести взгляд и вспомнить основные (главные) идеи. Допустимо выделять маркером (но очень немного) только то, что сначала не вспомнилось в процессе воспроизведения. При этом важно и перечитывать, и воспроизводить информацию в разных местах (например, когда идешь на занятия или в другой комнате, в другой аудитории). Вспоминание материала за пределами привычной среды обучения способствует улучшенному усвоению изучаемого. Это происходит незаметно, но, когда человек учит что-то новое, он подсознательно воспринимает стимулы от обстановки, в которой находится на тот момент. Это может стать дополнительным препятствием при извлечении из памяти и воспроизведении информации, потому что чаще всего это происходит не в тех местах/аудиториях, где изучался и запоминался новый материал. Вспоминая выученный материал в разных местах, студент становится независимым от сигналов привычной среды. Это позволяет справиться с новой обстановкой, в которой проходит проверка знаний/тестирование [14].

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описанные техники могут успешно применяться в работе со студентами, что будет облегчать процесс усвоения ими информации, делать их более вовлеченными в процесс обучения и способствовать развитию их саморегуляции. Для проверки этого предположения было проведено эмпирическое изучение саморегуляции и волевого самоконтроля студентов в начале занятий по дисциплине «Психология управления личностными ресурсами» и после ее завершения. В исследовании приняли участие магистранты Института компьютерных технологий и информационной безопасности ЮФУ ($n = 67$). Для диагностики саморегуляции студентов и уровня их волевого самоконтроля были использованы соответственно: опросник «Саморегуляция поведения» (В.И. Моросанова), включающий показатели планирования, моделирования, программирования, оценки результатов, а также показатели развития регуляторно-личностных свойств – гибкости и самостоятельности; Опросник волевого самоконтроля (ВСК) (А.Г. Зверков, Е.В. Эйдман), включающий шкалы «настойчивость» и «самообладание».

Количественная обработка информации включала использование способов статистического анализа данных: метод У Манна-Уитни для оценки различий между двумя выборками по уровню саморегуляции и волевого самоконтроля; угловое преобразование Фишера – для сопоставления количественного распределения студентов по уровню саморегуляции до и после использования образовательных технологий.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе исследования было выявлено, что уровень саморегуляции студентов (среднее по выборке) – 28,6 баллов, что что отражает ее средний уровень. Мониторинг особенностей распределения показателей по выборке позволил выявить 3 группы: группу с высоким уровнем саморегуляции (33 %), группу со средним уровнем саморегуляции (28 %) и группу с низким уровнем саморегуляции (39 %). Обращает на себя внимание распределение полученных результатов, на основании которых можно сделать вывод о преобладающей тенденции к среднему и низкому уровню саморегуляции в студенческой среде. По показателю волевого самоконтроля среднее значение по группе составило 12,5 балла, что соответствует среднему с тенденцией к низкому показателю.

Анализ содержательных особенностей саморегуляции показал, что для студентов с высоким уровнем саморегуляции (средний показатель по шкале общий уровень саморегуляции равен 35,7 баллов), характерна самостоятельность, умение гибко и адекватно реагировать на изменение условий, осознанное выдвижение и достижение цели. При высокой мотивации достижения они способны формировать такой стиль саморегуляции, который позволяет компенсировать влияние личностных, характерологических особенностей, препятствующих достижению цели. Большинство респондентов этой группы имеют сформированную потребность в осознанном планировании деятельности, планы в этом случае реалистичны, детализированы, иерархичны и устойчивы, цели деятельности выдвигаются самостоятельно (показатели регуляторной шкалы «планирование»: у 17 % опрошенных – в пределах нормы, у 83 % выше нормы). Они легче овладевают новыми видами активности, увереннее чувствует себя в незнакомых ситуациях, их успехи в привычных видах деятельности устойчивы и стабильны. Для достижения намеченных целей у этих студентов сформирована необходимость обдумывать методы своих действий и поведения, они устойчивы в случае появления трудностей, готовы пластично изменяться в новых жизненных обстоятельствах. Для людей с высоким уровнем саморегуляции свойственна развитая и адекватная самооценка, зрелость и постоянство личных критериев оценки результатов. Эти студенты адекватно оценивают как сам факт рассогласования полученных результатов с целью деятельности, так и приведшие к этому факторы, гибко адаптируясь к изменению условий. При несоответствии полученных результатов целям делается коррекция программы действий до получения приемлемого для них результата. Для данной группы свойственна способность самостоятельно планировать деятельность и поведение, организовывать работу по достижению

выдвинутой цели, контролировать ход ее выполнения, анализировать и оценивать как промежуточные, так и конечные результаты деятельности.

Для подавляющего большинства данной группы студентов свойственен средний уровень развития ВСК (67 %), а у 33 % опрошенных зафиксирован высокий показатель. Данные респонденты характеризуются независимостью, активностью, эмоциональной зрелостью и самостоятельностью. Они отличаются спокойствием, уверенностью в себе, ответственностью, устойчивостью намерений. У 78 % опрошенных главная ценность – начатое дело, которое они стремятся завершить, проявляя работоспособность, их мобилизуют преграды на пути к цели, не отвлекают альтернативы и соблазны. Средний уровень развития самообладания (зафиксирован у 53 %) объясняется тем, что студентам с высоким уровнем саморегуляции характерно внутреннее спокойствие, повышенная готовность к восприятию нового. Вместе с тем стремление к постоянному самоконтролю, излишнее намеренное ограничение собственной спонтанности может приводить к увеличению внутренней напряженности.

Студенты с низким уровнем саморегуляции (20,1 баллов) характеризуются низкой сформированностью потребности в осознанном планировании и программировании своего поведения, они более зависимы от ситуации и мнения окружающих людей. У этих респондентов снижена возможность компенсации неблагоприятных для достижения поставленной цели личностных особенностей. У большинства респондентов потребность в планировании развита слабо, цели подвержены частой смене, поставленная цель редко бывает достигнута, планирование мало реалистично. Они предпочитают не задумываться о своем будущем, цели выдвигают ситуативно и обычно несамостоятельно. Для студентов с низким уровнем саморегуляции характерна слабая сформированность процессов моделирования, которая приводит к неадекватной оценке значимых внутренних условий и внешних обстоятельств. У таких студентов часто возникают трудности в определении цели и программы действий, они не всегда замечают изменение ситуации, что также часто приводит к неудачам. Подавляющее большинство опрошенных этой группы не умеют и не желают продумывать последовательность своих действий. Предпочитают действовать импульсивно, часто сталкиваются с неадекватностью полученных результатов целям деятельности и при этом не вносят изменений в программу действий. Они не способны адекватно реагировать на ситуацию, быстро и своевременно планировать деятельность и поведение; им сложно разработать программу действий, выделить значимые условия, оценить рассогласование полученных результатов с целью деятельности и внести коррективы.

Для большинства респондентов данной группы свойственен низкий уровень развития ВСК (53 %), который характеризует людей чувствительных, эмоционально-неустойчивых, ранимых, неуверенных в себе, с невысоким уровнем рефлексивности. Сниженный фон активности и работоспособности часто компенсируется у таких людей повышенной гибкостью и изобретательностью, а также тенденцией к свободной трактовке социальных норм.

Сравнительный анализ показателей саморегуляции студентов позволил выявить достоверно значимые различия. Так достоверные различия были выявлены по показателю «планирование» ($U_{эмп}=34,5$ при $p\leq 0,01$), это свидетельствует о том, что люди с высоким уровнем саморегуляции в большей степени характеризуются способностью разрабатывать свои планы на будущее в мельчайших деталях, их планы реалистичны, они заранее планируют свой бюджет и редко следуют чужим советам. При этом респонденты с низким уровнем саморегуляции предпочитают не задумываться о своем будущем, часто меняют свои цели и редко их достигают. Обнаружены достоверно значимые различия по шкалам моделирования ($U_{эмп}=144,5$ при $p\leq 0,01$) и программирования ($U_{эмп}=31$ при $p\leq 0,01$): студенты с высоким уровнем саморегуляции, прежде чем взяться за дело собирают подробную информацию об условиях его выполнения, не бояться рисковать и редко отступаются от начатого дела. В то время как студенты с низким уровнем саморегуляции в меньшей степени склонны замечать изменения обстоятельств, не стремятся заранее представить последовательность своих действий, не умеют выделять главное.

Люди с высоким уровнем саморегуляции в большей степени склонны к самокритике, всегда замечают свои ошибки и в случае неудачи всегда ищут, что было сделано неправильно. При этом респонденты с низким уровнем саморегуляции не считают нужным перепроверять предпринятые действия, а также допускают небрежное отношение к своим обязательствам в случае усталости и плохого самочувствия ($U_{эмп}=38$ при $p\leq 0,01$). Также выявлено достоверно значимое различие по шкале «гибкость» ($U_{эмп}=204,5$ при $p\leq 0,01$). Респонденты с высоким уровнем саморегуляции, в отличии от людей с низким уровнем саморегуляции любят перемены в жизни, непринужденно чувствуют себя в незнакомой компании, легкоправляются с неожиданными ситуациями. Сравнивая самостоятельность ($U_{эмп}=313,5$ при $p\leq 0,01$) людей с разным уровнем саморегуляции, можно сказать, что уровни регуляторной автономности у них различные. Так, люди с высоким уровнем саморегуляции характеризуются независимостью, редко следуют чужим советам, в то время как респонденты с низким уровнем саморегуляции зависимы от мнения и оценок окружающих.

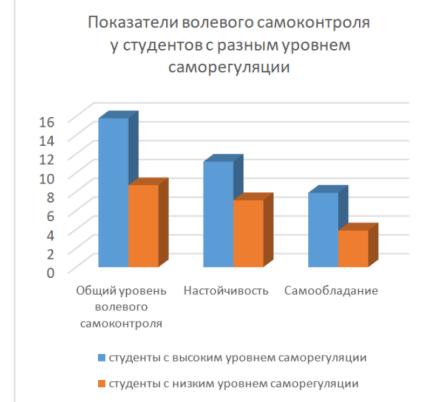


Рис. 1. Особенности волевого самоконтроля у студентов с разным уровнем саморегуляции

Сравнительный анализ показателей волевого самоконтроля (рис. 1) у людей с разным уровнем саморегуляции позволил выявить достоверно значимые различия по уровням развития волевого самоконтроля ($U_{\text{эмп}}=64$ при $p \leq 0,01$), настойчивости ($U_{\text{эмп}}=145,5$ при $p \leq 0,01$) и самообладания ($U_{\text{эмп}}=108,5$ при $p \leq 0,01$).

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что у респондентов с высоким уровнем саморегуляции хорошо развита способность выделять значимые условия достижения целей, они умеют правильно оценивать ситуацию, оперативно подбирать пути и способы достижения цели, а в случае необходимости вносить корректировку, в отличие от людей с низким уровнем саморегуляции, которые при быстрых изменениях ситуации, при неожиданном повороте событий могут испытывать существенные трудности с реализацией и перестройкой планов.

Очевидно, что полученные результаты доказывают необходимость мониторинга и развития саморегуляции и волевого самоконтроля у студентов, поскольку именно эти качества во многом обеспечивают успешность субъекта: учебную, профессиональную, личностную. После проведения серии занятий в рамках курса «Психология управления личностными ресурсами» с использованием интерактивно-коммуникативных и метапредметных образовательных технологий, когда студенты выполняли практические задания с использованием тренинговых технологий, деловых игр, групповой дискуссии, технологии ментальной карты, технологии запоминания и воспроизведения информации и др., были получены следующие результаты.

Среднее значение показателей саморегуляции и волевого самоконтроля по выборке составило соответственно 31,3 балла ($U_{\text{эмп}}=1579$; $U_{\text{кр}}=1333$) и 13,4 баллов ($U_{\text{эмп}}=1573,5$; $U_{\text{кр}}=1434$) при отсутствии достоверных различий. Отсутствие достоверных различий можно объяснить, во-первых, небольшим количеством занятий (12 занятий в семестре) и, во-вторых, их низкой частотностью (один раз в неделю), что не дает возможность устойчивого развития саморегуляции и волевого самоконтроля.



Рис. 2. Распределение студентов с разным уровнем саморегуляции до и после использования образовательных технологий

Однако распределение студентов на группы по уровню саморегуляции (рис. 2) показало, что после проведения занятий достоверно увеличилось количество магистрантов с высоким уровнем саморегуляции и уменьшилось количество студентов с низким уровнем: $\varphi^*_{\text{эмп}} = 1,656$, при $p \leq 0,05$.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Саморегуляция как целостная система выдвижения и управления достижением целей поведения и деятельности, включающая планирование, программирование, моделирование и оценивание результатов своей деятельности является основой волевого самоконтроля. Волевой самоконтроль, как отражение личностной зрелости и адекватности поведения, является важнейшим условием учебной, профессиональной и личностной успешности, поскольку коррелирует со способностью к самоуправлению, уверенностью в себе, личностной зрелостью.

Развитие саморегуляции и волевого самоконтроля приобретает особую актуальность в процессе обучения молодых людей (студентов), поскольку обеспечивает успешность их учебной деятельности и профессионального становления. Большую роль в этом случае приобретают специальные образовательные технологии: интерактивно-коммуникативные (групповая дискуссия, квест, деловые игры, брейншторминг, кейсы, тренинговые технологии и т.п.) и метапредметные. Метапредметные технологии способствуют формированию знаний через развитие собственной рефлексивной позиции, собственный опыт, волевой самоконтроль и саморегуляцию. Это технологии позволяющие понять как (а не что) правильно изучать, получать информацию, для достижения высоких результатов в любом виде деятельности.

Анализ уровня саморегуляции у студентов показал преобладание у них результатов среднего и низкого уровня, что свидетельствует о недостаточной сформированности потребности в осознанном планировании и программировании своего поведения, процессов моделирования, что приводит к неадекватной оценке значимых внутренних условий и внешних обстоятельств. У большинства из них возникают трудности в определении цели и программы действий, они не всегда замечают изменение ситуации, что также часто приводит к неудачам. Подавляющее большинство опрошенных не умеют и не желают продумывать последовательность своих действий. Предпочитают действовать импульсивно, часто сталкиваются с неадекватностью полученных результатов деятельности и при этом не вносят изменений в программу действий.

Применение интерактивных и метапредметных технологий в процессе образовательной деятельности показало наличие достоверных различий в количественном соотношении студентов в группах с высоким, средним и низким уровнем: увеличилось количество студентов с высоким уровнем и уменьшилось с низким уровнем саморегуляции. Однако среднее значение показателя саморегуляции по выборке до и после применения образовательных технологий изменилось достоверно не значимо, что предположительно объясняется недостаточно пролонгированным и недостаточно частым использованием соответствующих технологий в образовательном процессе. Перспективой исследования должна стать регулярная и более длительная программа (в формате тренинга или факультативного курса) использования интерактивных и метапредметных технологий в образовательном процессе в контексте мониторинга саморегуляции и волевого самоконтроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сигов А.С. Сидорин В.В. Требования к инженерам в условиях новой индустриализации и пути их реализации // Инженерное образование. – 2012. – № 10. – С. 80-91. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_21131218_66424081.pdf(дата обращения: 12.06.2021).
2. Panthalookaran, V. Gamification of physics themes to nurture engineering professional and life skills. IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON, 2018-April, – Р. 931-939. – DOI: 10.1109/EDUCON.2018.8363330.
3. Кибальченко О.Н., Эксакусто Т.В., Истратова О.Н. Интеллектуально-личностный ресурс субъекта развития: теоретические основы (монография). – Таганрог, Изд-во ЮФУ, 2017 – 160 с. – ISBN 978-5-9275-2362-7 .
4. Моросанова В.И. Саморегуляция и индивидуальность человека. – М.: Наука, Психологический ин-т РАО; Ин-т Психологии РАН, 2010. – 519 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23936930> (дата обращения: 23.06.2021).
5. Дикая Л.Г., Щедров В.И. Направленность и эффективность индивидуальных стилей саморегуляции функционального состояния человека // Социальные и гуманистические науки на дальнем востоке. – 2013. – № 2 (38), – С. 129-141. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20220810> (дата обращения: 12.06.2021).
6. Моросанова В.И. Индивидуальные особенности осознанной саморегуляции произвольной активности человека// Вестник московского университета. Серия 14: Психология. – 2010. – № 1. – С. 36-45. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14614161> (дата обращения 13.05.2021).
7. Зобнина Т.В., Кислякова Л.П. Исследование взаимосвязи осознанной саморегуляции произвольной активности и уровня субъективного контроля у студентов – будущих педагогов // Современные исследования социальных проблем (электронный научный журнал) – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 88-102. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35427087> (дата обращения: 13.05.2021).
8. Ким Э Сун. Сравнение самолидерства с саморегуляцией, самоуправлением и самоконтролем // Международный журнал прикладных наук и технологий INTEGRAL. – 2019. – № 3. – С. 22. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40083094> (дата обращения: 23.06.2021).
9. Бабинцева Л.Н Связь компонента «самоконтроль» социально-психологической компетентности с различными параметрами индивидуального стиля саморегуляции студентов-психологов // Вестник красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева. – 2017. – № 2 (40). – С. 120-126. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29368877> (дата обращения: 18.05.2021).
10. Боровская Н.В. Психологические и психофизиологические факторы лености студентов. автореф. дис. – СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2008. – 21 с. – URL: <https://viewer.rusneb.ru/tu/tsl01003462844?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 23.06.2021).
11. Фролова Ю.Г., Синкевич К.Д., Федосенко А.В. Способность к саморегуляции и воспринимаемый контроль как условия психологического благополучия студентов // Философия и социальные науки. – 2015. – № 4. – С. 48-53. – URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/134697> (дата обращения: 18.05.2021).
12. Потапова Н.В. Особенности проявления волевого самоконтроля как условие профессиональной успешности у врачей // Современные подходы в оказании экстренной психологической помощи. Сборник трудов молодых ученых (Экспериментальная платформа - 2018) / под общ. ред. А.В. Кокурина, В.И. Екимовой, М.И. Розеновой; Московский государственный психолого-педагогический университет. – Пермь, 2018. – С. 46-48. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36612576> (дата обращения: 12.06.2021).
13. Эксакусто Т.В., Кибальченко И.А. Развитие интеллектуально-личностного ресурса будущих IT-специалистов в условиях метапредметных образовательных технологий // IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов (п. Нижний Архыз , Россия 24–27 сентября 2019 г.); Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 508–516. – DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-508-516.
14. Oakley B.A., Schewe O. Learn Like a Pro: Science-Based Tools to Become Better at Anything Paperback. Publisher Essentials; Publication date 1 Jun. 2021. – 160 p. – ISBN-13 978-1250799371.
15. Gray-Grant D. 8 1/2 Steps to Writing Faster, Better. Paperback, First, 2008 by Highbury Street Books. – 120 p. ISBN13-9780980887716. – URL: <http://www.publicationcoach.com/8.5stepspage.php> (дата обращения: 11.05.2020).

Проблемное и проектное обучение: сравнительный анализ

Опрышко Анна Анатольевна

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

Волошин Александр Валерьевич

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

Аннотация. Данная статья носит научно-исследовательский характер и представляет собой сравнительный анализ проблемного обучения и проектного обучения. Рассмотрена история возникновения и использования этих двух технологий. Изучены и проанализированы различные точки зрения исследователей на понимание концепций проблемного и проектного обучения с целью определения схожести и различия этих двух понятий. Проанализированы как сами понятия, так и этапы, выделяемые при проектной деятельности и проблемном обучении.

Annotation. This research is a comparative analysis of problem-based learning and project-based learning. The history of the emergence and the use of these two technologies are considered. Various points of view of researchers on understanding the concepts of problem-based and project-based learning are studied and analyzed. It is done to determine the similarities and differences between these two concepts. Both the concepts and the stages allocated during project activity and problem-based learning are analyzed.

Ключевые слова, проблемное обучение, проектное обучение, методы обучения, обучение.

Keywords, problem-based learning, project-based learning, teaching methods, education.

I. ВВЕДЕНИЕ

Каждая глобальная система в мире характеризуется не только своими фундаментальными основами, но и претерпевает неизбежные изменения, связанные с развитием мира в целом. Образовательные системы также подвержены постоянным изменениям, поскольку необходимость соответствовать времени не только в знаниях, но и методах, заставляет эти системы меняться. Поиск и выработка новых подходов, путей развития, технологий и методов обучения, нацеленных на повышение эффективности и качества образования приводят не только к изменению системы образования, но и к изменению терминологии как в качественном, так и в количественном смысле.

Стремление учесть мельчайшие детали, нюансы того или иного подхода или метода приводит к появлению нового термина. Таким образом, у одного и того же подхода или метода появляется альтернативное называ-

ние. Такое происходит не только в рамках изобретения новых подходов или методов, но и с любыми другими явлениями, которые характеризуют изменения в образовательных системах. Обоснованность и необходимость в выработке нового термина часто неоднозначна и не всегда оправданна, поскольку приводит к количественному росту терминов и как следствие путанице. Цель данной статьи заключается в том, чтобы разобраться в двух близких по значению терминах и стоящей за ними технологии или методе - проектное обучение (проектный метод обучения) и проблемное обучение (проблемно-ориентированное обучение), и определить их характерные особенности и различия. Для достижения данной цели проанализирована история возникновения этих видов обучения, а также проанализированы различные формулировки понятий проектного и проблемного обучения как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

II. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что большинство исследователей считают, что в основу как проектного обучения, так и проблемного обучения легли идеи Дж. Дьюи, который в свою очередь использовал в своей концепции так называемый «метод Сократа». Сократ предлагал не передавать готовые знания, а вырабатывать истину, решать какую-либо проблему или ситуацию в диалоге. Джон Дьюи считал, что в процессе любой практической деятельности обучающийся должен самостоятельно вырабатывать решения возникающих проблем и таким образом получать знания. Так Томина Е.Ф. в своей работе по исследованию педагогических идей Дж. Дьюи говорит, что «педагогические идеи ученого Дж. Дьюи во многом созвучны задачам, стоящим перед школой, как в прошлом, так и в настоящее время, и поэтому требуют современного осмысливания в связи с развитием проблемного обучения» [1]. Здесь, в контексте идей Дж. Дьюи рассматривается именно проблемное обучение, возможно потому, что в работах Дж. Дьюи акцент делается на решение возникающей проблемы. В научной статье Теминой С.Ю. и Портновой Т.А. проблемное обучение также связывается с идеями Дж. Дьюи, а именно, авторы утверждают, что «современная трактовка проблемного обучения за рубежом основывается на идеях Джона Дьюи, предла-

гавшего заменить традиционное обучение самостоятельным учением школьников посредством решения возникающих в практической деятельности проблем. В его представлении мыслительный процесс человека инициируется при встрече с трудностями, препятствиями, преодоление которых для него представляется значимым, существенным» [2]. Аниельсон Барбоса да Силва, Ана Каролина крута де Араужо Биспо и другие также в своей работе связывают идеи Джои с проблемным обучением [3].

Однако в статье Каракева А.А. идеи Дж. Джои рассматриваются уже не в контексте решения проблемы, а как основа проектного метода обучения – «Джои предлагал строить процесс обучения исходя из потребностей, интересов и способностей детей и считал, что обучение должно приносить пользу каждому учащемуся, что школа должна развивать врожденные интеллектуальные или практические «импульсы» ученика. Обучение, считал Джои, необходимо организовывать вокруг какого-либо дела, задания. При этом знания извлекаются из самостоятельной практической деятельности учащихся и из их личного жизненного опыта. Роль учителя сводится к руководству этой деятельностью и побуждению любознательности школьника. На основе этих идей Дж. Джои его последователями и был выдвинут метод проектов как альтернатива классно-урочной системы обучения. Сущность и ценность метода проектов состояла в том, что он позволяет детям найти и выбрать деятельность по душе и интересам, соответствующую их силам и способствующую зарождению новых импульсов к последующим делам. Метод проектов был направлен на воспитание человека деятельного и предпринимчивого, способного самостоятельно составлять и реализовывать свои планы» [4]. Разница в восприятии идей Дж. Джои в данной цитате, скорее всего обусловлена углом, под которым эти идеи рассматриваются, и контекстом, в котором они применяются. Если ранее акцент ставился на решение проблемы, то сейчас он смещается на то, каким образом та или иная проблема (план) решается. Это можно отметить и в работе Артемова М. Ю., посвященной исследованию возникновения метода проектов, где он указывает на то, что «Дж. Джои организовывал трудовые школы, где дети получали возможность применять полученные знания на практике или через практику могли бы прийти к теоретическим знаниям. Его попытка научно описать этот процесс положила начало проектной методологии» [5]. Таким образом автор связывает идеи Дж. Джои и влияние их на возникновение проектного обучения.

Интересно, что в работе Кондрашовой Е.Н., Веденеевой О.А., Веденеевой А.О. по исследованию истории проектного обучения идеи Джои скорее рассматривают через призму решения проблем: «В своей книге «Психология и педагогика мышления» Дж. Джои предложил заменить традиционные формы и методы самостоятельным учением школьников путем решения проблем. При этом особый упор делался на решение учебно-практических проблем. Дж. Джои выделил пять отдельных логических ступеней в решении задач, которые легли в основу проблемного метода обучения [6]: – чувство затруднения; – его определение и определение его границ; – представление о возможном решении; – развитие путем рассуждения об отношениях представле-

ния; – дальнейшие наблюдения, приводящие к признанию или отклонению, т.е. заключение уверенности или неуверенности» [7]. Паоло Бальдиссера и Кристиана Дельбрете в своей работе о проектном обучении также обращают внимание на то, что корни этой методологии приписываются педагогу и философу Джону Джои, утверждающему, что студенты склонны делать личные инвестиции в предмет, если они занимаются реальными, значимыми задачами и проблемами [8]. Опять же проектный метод обучения рассматривается через призму решения определенной проблемы, задачи.

В своей работе о трансформации образования Фернандо М. Реймерс указывает на то, что некоторые возможности, необходимые для процветания в 21 веке, лучше всего получить, привлекая студентов к реальным проблемам и приглашая их попробовать решения этих проблем. Он объединяет проблемное и проектное в одно понятие и говорит, что такое образование опирается на традиции прогрессивного образования, разработанные Джоном Джои, и согласуется с современными знаниями о том, как поддерживать более глубокое обучение, чтобы подготовить студентов к будущему [9]. Таким образом можно сделать вывод, что истоки как проектного метода обучения, так и проблемного обучения заключаются в идеях Дж. Джои, что характеризует данные технологии схожестью в постановке цели, задачи, проблемы, и последующему ее решению.

Помимо Джона Джои, многие исследователи проблемного и проектного обучения в своих работах отмечают заслуги и других ученых, таких как Дж. Брунер и У. Килпатрик. Однако, если идеи Дж. Брунера больше связывают с проблемным обучением, то У. Килпатрика считают основателем проектного обучения.

Дж. Брунер, говоря о проблемном обучении, отмечал, что учебный материал должен излагаться в незавершенной форме, а ученик сам должен организовывать воспринимаемую информацию, выявляя отношения и связи между элементами информации, анализируя и структурируя полученные знания. Брунер считал, что такое обучение «посредством открытых» позволяет ученику лучше осмысливать и запоминать полученную информацию, и применять в последствии ее на практике.

Американским педагог У. Килпатрик был учеником и последователем Д. Джои, что вполне логично повлияло на его идеи о проектном обучении. И хотя считается, что проектный метод обучения имеет довольно длительную историю, именно книга «Проектный метод» Уильяма Килпатрика сделала известным данный способ приобретения знаний и навыков и распространила его в педагогике. Казун А.П. и Пастухова Л.С. в своем анализе по опыту применения методов проектов отмечают, что Килпатрик позиционировал этот метод как «новый метод, связывавший реальную жизнь и теорию, противопоставлялся классическому лекционному обучению. Происходило изменение роли учеников: они становились более активными участниками образовательного процесса; и роли учителей: им надлежало направлять работу учащихся, а не транслировать готовую информацию» [10]. Однако в работе Аниельсон Барбоса да Силва, Ана Каролина крута де Араужо Биспо и других отмечается, что такая образовательная стратегия, как проблемно-ориентированное обучение, а никак не проект-

ное обучение, которая учитывает сложный характер обучения на основе проблемы и ценит практический опыт обучения, основана на образовательных подходах Уильяма Килпатрика. Действительно, по словам Теминой С.Ю. и Портновой Т.А. «в представлении У. Килпатрика, проектная деятельность может быть нацелена не только на производство конкретного продукта, но и на разрешение каких-либо интеллектуальных проблем, затруднений. Он считал необходимым вооружение учащихся методами исследовательской деятельности, решения проблем. В этом контексте проектное обучение можно рассматривать как один из видов проблемного обучения» [2].

Таким образом, можно сделать вывод, что несмотря на название книги «Проектный метод», Уильяма Килпатрика нельзя считать одним из основателей только лишь проектного обучения, его идеи повлияли как на проблемное обучение, так и на проектное обучение. Что опять же подтверждает теорию о схожести двух концепций обучения: проектного обучения и проблемного обучения.

Исходя из анализа работ по истории возникновения теории методов проекта и проблемного обучения, можно с уверенностью отметить, что эти теории связывают одни и те же имена в педагогике, а именно, прежде всего Дж. Дьюи и его последователи Дж. Брунер и У. Килпатрик. Стоит отметить, что не только эти педагоги разрабатывали данные теории, но и в последствии многие другие продвигали их в жизнь и в современную систему образования как в России, так и за рубежом.

III. СОВРЕМЕННОЕ ПОНИМАНИЕ ПОНЯТИЙ «ПРОБЛЕМНОЕ ОБУЧЕНИЕ» И «ПРОЕКТНОЕ ОБУЧЕНИЕ»

Исторический экскурс в истоки возникновения проектного и проблемного обучения позволяет сделать следующий вывод, что за этими терминами стоит много общего смысла, а именно [11]:

- В первую очередь ставится цель (задача, проблема), которую необходимо решить в рамках проектной или проблемной деятельности;
- Характер работы как в проектной, так и проблемной деятельности является скорее самостоятельным для обучающихся;
- Учитель играет роль не лектора или транслятора знаний, а роли некоего фасilitатора или помощника;
- Происходит ярко выраженная взаимосвязь теории и практики;
- Этапы как проектной, так и проблемной деятельности идентичны (постановка проблемы, действия по решению этой проблемы, результаты).

При такой идентичности в понимании этих двух технологий, сложно выделить что-либо, что ярко характеризовало бы различие между ними. По нашему мнению, основное отличие в том, на что именно ставится акцент в той или иной деятельности. Если акцент ставится на саму проблему и на обучающего, который ее самостоятельно решает, то речь идет скорее о проблемном обучении. Если акцент ставится на сам процесс

решения проблемы, а еще и решается она в группе обучающихся, то речь идет о проектном обучении. Однако, такой вывод может быть ошибочным в рамках современного понимания данных видов обучения.

Совершенно очевидно, что с развитием педагогики и методики преподавания, эти две технологии претерпевали изменения и расширяли свои понятия. Рассмотрим современную трактовку понятий «проектное обучение» и «проблемное обучение» в целях определения масштаба изменений на современном этапе развития педагогики.

В первую очередь, стоит отметить, что помимо понятий проектное обучение и проблемное обучение, появились такие производные как проектный метод обучения, проектно-ориентированное обучение и проблемно-ориентированное обучение. Если в случае с проектным методом обучения и проектным обучением можно определить отличие в масштабе применения данной технологии, иными словами, если мы говорим о методе, то скорее всего мы применяем его в рамках одной дисциплины или тематики, если говорим о курсе обучения в целом, то речь идет о проектном обучении. Однако в случае с проблемным обучением и проблемно-ориентированным обучением не все так просто.

Некоторые исследователи разделяют эти два понятия. Это довольно спорный вопрос, поскольку суть применения данной технологии остается примерно одной и той же. Возникновение данной спорной ситуации обусловлено несколькими факторами. Во-первых, это язык, на котором возник сам термин. Стоит учитывать тот факт, что истоки проблемного обучения или проблемно-ориентированного обучения имеют англоязычные корни. Англоязычный вариант как проблемного, так и проблемно-ориентированного обучения звучит как problem-based learning и имеет общепринятую аббревиатуру PBL, как, впрочем, и проектное обучение – project-based learning (PBL). Поэтому четкое разделение понятий проблемное обучение и проблемно-ориентированное обучение в данном случае едва ли имеет смысл. Во-вторых, сама система образования играет важную роль. То, каким образом данная технология встраивается в учебный процесс, отражается в учебных планах и системе обучения в целом влияет на понимание концепции проблемного обучения. Так в своей исследовательской работе Позднеева С. И., говоря о различии между проблемным обучением и проблемно-ориентированном обучением, указывает, что проблемно-ориентированное обучение (а именно так переводится в ее понимании термин problem-based learning) «в отличие от классического проблемного обучения, – это не просто технология, реализуемая в учебном процессе, а особый тип образовательной практики в вузе, под который адаптированы все элементы обучения: учебный план, расписание занятий, учебные форматы, содержание курсов, формы контроля и оценки» [12]. Таким взглядом на вопрос о разнице в вышеупомянутых терминах настальивает на вполне логичный вывод о том, что все зависит от масштаба применения данной технологии, но едва ли обуславливает спор о необходимости разграничения этих двух понятий.

В нашем исследовании мы рассматриваем характеристики двух понятий «проблемное обучение» (problem-based learning) и «проектное обучение» (project-based

learning). Вариации в терминологии нами учитываться не будут, поскольку большинство авторов считают идентичными названия проблемное обучение и проблемно-ориентированное обучение, а также проектное обучение и проектно-ориентированное обучение.

Определений, что такое проектное и проблемное обучение существует множество как в зарубежной, так и отечественной литературе.

Проблемное обучение считается активной стратегией обучения, поскольку студентам рекомендуется брать на себя ведущую роль в их собственном профессиональном обучении и образовании. Использование такой стратегии в контексте обучения позволяет студенту выйти за рамки пассивной роли, столкнуться с проблемой и развить чувство самостоятельности в поиске знаний, необходимых для ее решения [3]. Гви подчеркивает, что проблемное обучение нацелено на улучшение и оптимизацию образовательных результатов, поскольку оно ориентировано на учащихся, основано на сотрудничестве, контекстуально, интегрировано и ориентировано на себя, а также способствует более рефлексивному обучению [14], оно также предоставляет учащимся возможность работать совместно и развивать способность учиться под своим собственным руководством [13, 14]. Однако отмечается, что на проблемное обучение может влиять структурная и педагогическая среда, в которой оно происходит, поскольку оно включает такие факторы, как предмет, студенты, преподаватели и организации [3]. В контексте проблемного обучения учитель выступает в качестве посредника в совместном обучении [15]. Такое обучение нацелено на то, чтобы побудить студентов использовать свои предварительные знания для принятия решений с акцентом на решение проблем что помогает им быть более рефлексивными и ответственными за собственное обучение [3].

Проблемное обучение – это метод, посредством которого учащиеся учатся путем облегченного решения проблем. Студенты изучают реальные проблемы, которые не имеют какого-либо единственного правильного решения, но, как правило, сложны, открытые и плохо структурированные. Студенты должны решить, что им нужно узнать, и какие навыки им нужно приобрести, чтобы эффективно управлять ситуацией [11].

В своем анализе определений проблемного обучения Граафф и Колмос [15] различают три уровня: центральные теоретические принципы обучения, конкретные модели, основанные на проблемном обучении, и различные практики, которые следуют рекомендациям традиционных образовательных моделей, но включают элементы проблемного обучения в свои теории, модели и практики. С точки зрения теоретических перспектив, проблемное обучение может быть связано с образовательным подходом, который берет проблему в качестве отправной точки для процесса обучения, который основан на таких перспективах, как обучение, ориентированное на учащихся, обучение на основе опыта, обучение на основе деятельности, междисциплинарное обучение, сосредоточение на практических примерах и совместное групповое обучение. В качестве модели проблемное обучение включает в себя следующие компоненты: структуру учебного плана программы, групповое обучение и оценку. Другие модели основаны на обуче-

нии на основе проектов и на том, связанны ли проекты с задачей, предметом или проблемой. Обсуждение проблемного обучения как практики включает в себя способ реализации стратегии с акцентом на ее цели, мотивацию, вовлеченность учащихся, взаимосвязь между стратегией преподавания и глубиной и сложностью обучения, а также то, как учащийся развивает более сложный уровень аналитического понимания с помощью задания, основанного на проблемах. Существует несколько путей к практике проблемного обучения, и учителя могут дать студентам возможность развивать более индуктивное или более дедуктивное мышление, соотнося свои цели с проектом на трех уровнях: общая структура, темы и типы проблем или формулирование предложений. Понимая эти уровни различий в рамках проблемного обучения, можно понять, что они являются интегрированными, а не несвязанными, и поэтому учителя должны понимать теоретические основы проблемного обучения и то, как стратегия может быть реализована в контексте преподавания, а также четко представлять роли участников.

Савин-Баден и Майор [16] в своем обсуждении основных принципов проблемного обучения, основанном на анализе исследований по этому предмету, также выделяют три параметра для облегчения понимания, которые авторы описывают как широкие области дифференциации:

- основные характеристики проблемного обучения включают организацию интегрированных учебных программ и занятий по проблемам, в дополнение к акценту на когнитивные навыки;
- определенные условия, такие как небольшие группы, обучение по учебнику и активное обучение;
- проблемное обучение подчеркивает результаты, такие как развитие навыков и мотивация к продолжению обучения в течение всей жизни.

Проблемное обучение требует от студента интеграции различных областей знаний, способствует развитию навыков самостоятельного обучения.

Отечественные авторы также выделяют разные подходы к пониманию проблемного обучения. Так в работе Теминой С.Ю. и Портновой Т.А. отмечается, что « некоторые исследователи различные способы организации обучения на высоком уровне познавательной самостоятельности учащихся относят к проблемному обучению (М.А. Данилов, Дж. Брунер, Ги Лефрансуа, Л. Корно, Р.Е. Сноу и др.). Они полагают, что различные виды проблемного обучения отличаются разной степенью самостоятельности учащихся при решении проблем, рассматривая весь диапазон применения методов обучения от проблемного изложения учебного материала с достаточно активной ролью учителя до эвристического и исследовательского способов организации обучения, при которых существенно возрастает уровень познавательной активности учащихся. В этом случае проблемное обучение представляет собой обобщенный вид организации обучения, включающий в себя целый ряд других дидактических концепций (эвристическое обучение, обучение посредством открытых, кейс-технологий и др.). Другие исследователи отдельно выделяют концепции проблемного обучения, эвристического обучения, иссле-

довательского обучения. Этую точку зрения разделяют, к примеру, отечественные дидакты И.Я. Лернер, А.М. Матюшкин, М.И. Махмутов, А.В.Хуторской и др.» [2].

Так же авторы указывают на то, что различные концепции проблемного обучения объединяет схожесть в организации основных этапов познавательной деятельности учащихся: формулировка проблемы, поиск информации, выдвижение гипотез, формулировка выводов, применение полученных результатов в новой ситуации [2].

Результаты авторов по исследованию проектного обучения тоже представляют интерес и в чем-то созвучны с результатами по проблемному обучению. Темина С.Ю. и Портнова Т.А. в своей работе по исследованию общего и характерного между проектным и проблемным обучением подчеркивают, что «проектное обучение базируется на решении проблем, имеющих прикладное значение, в одной или нескольких дисциплинарных областях. В процессе реализации проекта разрабатывается план деятельности, определяется конечная цель работы и ее ожидаемый результат» [2]. Авторы отмечают, что «этапы, выделяемые в проектной деятельности достаточно близки этапам проблемного обучения: формулирование проблемы, поиск информации, планирование и последующая реализация действий по решению проблемы, представление результата, оценка успешности.» [2].

Существуют и другие определения проектного обучения. Проектное обучение предполагает специальную организацию самоуправляемой учебно-профессиональной деятельности малой группы студентов через совокупность поисковых, проблемных, творческих методов, ведущих к созданию конкретного продукта [11]. В работах Е.С. Полат под технология проектного обучения понимается способ достижения дидактической цели через детальную разработку значимой для учащихся проблемы, которая должна завершиться практическим результатом, оформленным тем или иным образом в виде некоего конечного продукта [17]. Базовой задачей проектного обучения является моделирование ситуации, когда команда работает над реальным проектом в реальном коллективе.

Если говорить о проектном обучении студентов университетов, то проектное обучение определяется как вид отдельной, специально организованной деятельности студентов, нацеленной на решение определенной проблемы и имеющей в качестве результата конечный продукт деятельности. Динамичный опыт внедрения проектного обучения позволяет сформировать различия между классической моделью образования и современной моделью проектной практики. В настоящее время в качестве главной цели внедрения проектного обучения представляется сближение университета с потребностями отраслей экономики и реальной профессиональной практикой. Иными словами, делается акцент на связь теории и практики. Проектное обучение нацелено на разработку студентами востребованного практического решения через реализацию полного жизненного цикла проекта. При таком подходе немаловажную роль в цикле проектного обучения играет междисциплинарный подход и командная работа. При внедрении проектного обучения можно говорить о достижении студентами дополнительных образовательных результатов. Если

говорить о проектном обучении в масштабах всего образования в целом, то реализация проектного обучения требует изменения в организации учебного процесса. Это системный процесс, который должен охватывать всю плоскость обучения (весь курс, весь поток, все направления). Внедрение проектного обучения на отдельных специальностях или направлениях не дает эффекта в перспективе. Эффективная модель проектного обучения представляет собой совместную деятельность преподавателей, внешних экспертов, менторов, заказчиков и студентов. Обучение на основе проектов в университетской образовательной траектории является широко изученным подходом, основанным на конструктивистском выводе о том, что студенты получают более глубокое понимание определенной темы, когда их просят развивать свои знания, работая с идеями и используя их [18].

Интересно, что по мнению Казун А.П. и Пастуховой Л.С. именно «значительная протяженность во времени отличает проектное обучение от проблемного, сфокусированного на конкретной ситуации. Время выполнения является важной характеристикой любого проекта, и часто именно вызванные им ограничения снижают результативность. Как правило, учебный проект продолжается от нескольких месяцев до одного года – сроки варьируются в зависимости от задач, которые поставлены перед его участниками. Проектно-ориентированное обучение всегда подразумевает коллективную деятельность. Это позволяет студентам приобрести умение работы в команде, навыки лидерства, учит распределению обязанностей между коллегами, разрешению конфликтов и др. Главной задачей любой проектной команды является достижение синергетического эффекта, при котором результат оказывается больше, чем просто сумма усилий отдельных студентов. Особенность работы над учебным проектом заключается также в том, что он предполагает поиск ответа на определенный вопрос, который часто формулируется в виде проблемы [10].

Таким образом, анализируя вышеобозначенные точки зрения исследователей концепций проблемного обучения и проектного обучения, можно выделить несколько аспектов. Во-первых, есть очень много общего в сути проектного и проблемного обучения, а именно, в определении проблемы (задачи) и ее последующем решении. Решение этой задачи происходит в группе. Этапы решения проекта или проблемы практически всегда совпадают. Во-вторых, в качестве отличительных признаков двух концепций часто выделяют время или протяженность решения задачи или проекта, с чем можно не согласиться. Также некоторые авторы сходятся во мнении, что проектное обучение базируется на решении проблем, имеющих прикладное значение, в одной или нескольких дисциплинарных областях, тогда как проблемное обучение ориентировано на решение проблем в определенной дисциплинарной области. С этим утверждением тоже можно не согласиться. В-третьих, некоторые исследователи выделяют уровни в понимании концепций проблемного и проектного обучения, что совершенно справедливо позволяет внести ясность не только в понимании данных концепций, но и в применении их на практике. В-четвертых, формированию определенных навыков, таких как организованность, работа в команде, мотивация, самостоятельность и т. д., спо-

существуют обе типа обучения как проектное, так и проблемное. И проблемное и проектное обучение поддерживают мотивацию студентов и способствуют возможной передаче из контекста исследования в контекст профессиональной деятельности. Так же можно обозначить, что концепции проблемного и проектного обучения разделяют следующие основные педагогические идеи [19]:

- признание базовым опытом учащихся;
- опора на студентов, берущих на себя ответственность за свое собственное обучение;
- преодоление границ между дисциплинами;
- взаимосвязь теории и практики;
- фокус на процессах приобретения знаний, а не только на продуктах таких процессов;
- изменение роли педагога от преподавателя к фасilitатору;
- перенос акцента с оценки результатов обучения преподавателем на оценку самим студентом и коллегами;
- акцент на коммуникации и навыках межличностного общения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Томина Е.Ф. Педагогические идеи Джона Дьюи: история и современность // Вестник ОГУ. – 2011. – № 2 (121)/февраль. – С. 360-366.
2. Темина С.Ю., Портнова Т.А. Общее и особенное в концепциях проблемного и проектного обучения // Педагогика и психология (Казахстан, Алматы). – 2013. – № 2 (15). – С. 42- 47.
3. Anielson Barbosa Da Silva, Ana Carolina Kruta de Araújo Bispo, Danilo Gonçalves Rodriguez and Francisco Ialyson Felipe Vasquez. Problem-based learning A proposal for structuring PBL and its implications for learning among students in an undergraduate management degree program//Revista de Gestão. – 2018. – Vol. 25, No. 2. – P. 160-177. Emerald Publishing Limited 2177-8736. – DOI 10.1108/REGE-03-2018-030.
4. Карапев А.А. Категория опыта в педагогической философии Дж. Дьюи и проектный метод обучения школьников // Преподаватель. XXI век. – 2007. – № 1. – С. 6769.
5. Артёмов М.Ю. Метод проектов и проектная деятельность: история вопроса // Проект и проектная деятельность в школе: Сборник научно-методических трудов [Электронный ресурс] / под ред. профессора Е. С. Антоновой. – М., 2017. – С. 15-30.
6. Дьюи Дж. Психология и педагогика мышления (Как мы мыслим). – М.: Лабиринт, 1999. – 192 с
7. Кондрашова Е.Н., Веденеева О.А., Веденеева А.О. К вопросу об истории возникновения метода проектов // Проблемы современного педагогического образования. – 2020. – № 69-3. – С. 123-125.
8. Paolo Baldissera and Cristiana Delprete. From PBL to innovation: a decennial case-study from an HPV student team // Journal of Engineering, Design and Technology. – 2020. – Vol. 18, No. 4. – P. 773-786. Emerald Publishing Limited 1726-0531. – DOI 10.1108/JEDT-01-2019-0005.
9. Fernando M. Reimer. Transforming education to prepare students to invent the future PSU // Research Review. – 2020. – Vol. 4, No. 2. – P. 81-91. Emerald Publishing Limited 2399-1747. – DOI 10.1108/PRR-03-2020-0010 .
10. Казун А.П., Пастухова Л.С. Практики применения проектного метода обучения: опыт разных стран // Образование и наука. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 32-59. – DOI: 10.17853/1994-5639-2018-2-32-59.
11. Lyz N., Lyz A., Opryshko A. Person development technologies to enhance soft skills of engineering students // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences. – 2018. – Vol. LI. – P. 134-144.
12. Поздеева С.И. Проблемное и проблемно ориентированное обучение (problem-based learning): сравнительный анализ // Сибирский педагогический журнал. – 2016. – № 2. – С. 95-99.
13. Gwee M.C. Problem-based learning: a strategic learning system design for the education of healthcare professionals in the 21st century // Kaohsiung Journal of Medical Sciences. – 2009. – Vol. 25, No. 5. – P. 231-239.
14. Hmelo-Silver C.E. “Problem-based learning: what and how students learn? // Educational Psychology Review. – 2004. – Vol. 16, No. 3. – P. 235-266.
15. Graaff E. and Kolmos A. Characteristics of problem-based learning // International Journal of Engineering. – 2003. – Vol. 19, No. 5. – P. 657-662.
16. Savin-Baden M.. and Major C.H. Foundations of Problem-based Learning, Open University Press – Mc-Graw Hill Education, New York, NY, (2004).
17. Полат Е.С. Метод проектов: типология и структура // Лицейское гимназическое образование. – 2002. – № 9. – С. 9-17.
18. Krajcik J.S. and Blumenfeld P.C. Project-Based Learning, Cambridge Handbooks in Psychology, Cambridge University Press, 2005. – P. 317-334.
19. Andersen A.S., & Heilesen S.B. The problem-oriented project work (PPL) alternative in self-directed higher education / In P. Blessinger, J. M. Carfora (Ed.), Inquiry-Based Learning for Multidisciplinary Programs: A Conceptual and Practical Resource for Educators. – 2015. – P. 23-41. Emerald Group Publishing Limited. – DOI: 10.1108/S2055-364120150000003019.

Опыт внедрения проектной деятельности

Плёнкин Антон Павлович

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
pljonkin@sedu.ru

Компаниец Виталий Сергеевич

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
kompaniets@sedu.ru

Ищукова Евгения Александровна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
uaishukova@sedu.ru

Федотова Анна Юрьевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
ayfedotova@sedu.ru

Самойленко Валерия Сергеевна

Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности
Южный федеральный университет
Таганрог, Россия
vsamoylenko@sedu.ru

Аннотация. Рассмотрены тенденции изменения в образовательном подходе. Проведен сравнительный анализ классической модели обучения и современных методик. Описан опыт внедрения проектного обучения в университете и показаны результаты после двух лет применения. Рассмотрены особенности интеграции проектных методов в классическое обучение. Показана схема организации проектного направления в университете. Приведена методика образовательного процесса с использованием проектного обучения студентов в высшей школе и университете. Показаны примеры проектных решений для отдельных образовательных курсов. Проведен анализ эффективности рассмотренного метода с точки зрения получения студентами новых компетенций.

Annotation. The trends of changes in the educational approach are considered. A comparative analysis of the classical training model and modern methods is carried out. The experience of implementing project-based learning at the university is described and the results after two years of application are shown. The features of the integration of project methods into classical learning are considered. The scheme of the organization of the project direction at the university is shown. The article presents the methodology of the educational process using project-based training of students in higher school and university. Examples of design solutions for individual educational courses are shown. The analysis of the effectiveness of the considered method from the point of view of obtaining new competencies by students is carried out.

Ключевые слова: проектное обучение, образование, методика, практика.

Keywords: project training, education, methodology, practice.

I. ВВЕДЕНИЕ

В образовании сформировались классические модели, которые различаются между собой аспектами подхода к обучению. Требования к образованию формируются в зависимости от уровня развития общества и его адаптации к современным условиям. В моделях образования используется различный подход к изучению точных и гуманитарных наук. Это же относится к практической и теоретической подготовке, к усвоению истории и

стремлению к новому. Принято считать, что условно классические модели обучения подразделяются на европейскую, американскую, советскую и японскую. В чистом виде нельзя выделить характерные черты какой-то модели и современное образование применяет их сочетание. Стоит выделить базовую модель, которая лежит в основе большинства школ – Liberal Arts. Такая концепция предполагает самостоятельный выбор учащимися определенных жизненных ценностей и их способность нести ответственность за свой выбор.

Для примера рассмотрим особенности классических школ обучения. Немецкая школа подразумевает стремление к порядку и подчинению. При этом любое отклонение от общепринятых правил считается грубейшим нарушением. Французская классическая школа в обучении делает акцент на развитии личных способностей и достижений учащихся. Здесь в большей степени преобладает индивидуализм. Английская школа учитывает социальный статус студента и его принадлежность к определенному общественному слою. Также играет роль наследственность. Финская модель делает упор на развитие информационных технологий в обучении и достигла определенных успехов в этом направлении. Американская модель образования является относительно молодой и базируется на Liberal Arts. Основная цель обучения в США – выбор студентами учебных предметов и в конечном итоге выбор будущей профессии. Каждая из описанных моделей имеет преимущества и недостатки.

Стремительное развитие информационных технологий отражается на тенденциях в образовании. Современные выпускники сталкиваются с проблемой разности полученных знаний и требований к профессии. Такая ситуация возникает в тех случаях, когда требования работодателя оказываются несоответствующими уровню знаний молодого специалиста. Такая ситуация привела к появлению компетенций в образовании. Компетенции – это набор навыков (знать, уметь, владеть), которыми овладевает

обучающийся за время обучения. Современные модели образования стремятся к тому, чтобы набор компетенций в учебном заведении совпадал с компетенциями у работодателей. На практике у работодателей требования практически всегда выше, чем в учебной программе.

Современная система образования требует внедрения новых подходов, которые обеспечивают минимизацию разницы между получаемыми и требуемыми компетенциями.

Один из таких подходов заключается во внедрении проектного обучения в образовательную программу [1]. При этом перед студентами стоит задача освоения компетенций, позволяющих реализовывать комплексные проекты и инициативы. Как правило, образовательная система испытывает дефицит управленческих механизмов и инструментов, способных интегрировать проектную подготовку в учебный процесс. В первую очередь необходимо решать проблему нехватки специалистов, способных обеспечивать развитие проектных технологий (наставники, менторы, тьюторы и т.д.). Важную роль играют механизмы вовлечения студентов и преподавателей в проектную деятельность. Такие методы представляют особенную ценность. В настоящее время многими странами и университетами уже накоплен большой опыт и сформирован значительный практический перечень знаний для реализации проектного обучения. Можно говорить о том, что модернизация образовательной модели в целом изменяется в сторону интеграции проектной работы в процесс обучения. Классическая модель образования трансформируется и адаптируется к реалиям технического прогресса.

В статье мы описываем наш опыт внедрения проектного обучения в рамках классической образовательной модели и показываем результат двухлетней аналитики.

II. МОДЕЛЬ ПРОЕКТНОГО ОБУЧЕНИЯ

В общем виде проектное обучение предусматривает наличие проектов в процессе обучения студентов. Важно понимать, что составляющие хардскиллс и софтскиллс должны быть предусмотрены в учебной программе. Запросы работодателей показывают, что компетенции хардскиллс должны граничить с компетенциями софтскиллс. Студент, обладающий только навыками хардскиллс не в полной мере, соответствует вызовам современных компаний. С другой стороны, мы понимаем, что наличие в учебной программе одновременно двух составляющих превращает такую программу обучения в междисциплинарную. Базовой задачей проектного обучения является моделирование ситуации, когда команда работает над реальным проектом в реальном коллективе.

Проектное обучение определяется как вид отдельной, специально организованной деятельности студентов, направленной на решение определенной проблемы и имеющей в качестве результата конечный продукт деятельности. Динамичный опыт внедрения проектного обучения позволяет сформировать различия между классической моделью образования и современной моделью проектной

практики. В качестве главной цели внедрения проектного обучения представляется сближение университета с потребностями отраслей экономики и реальной профессиональной практикой. Проектное обучение нацелено на разработку студентами востребованного практического решения через реализацию полного жизненного цикла проекта. При таком подходе немаловажную роль в цикле проектного обучения играет междисциплинарный подход и командная работа. При внедрении проектного обучения можно говорить о достижении студентами дополнительных образовательных результатов. Реализация проектного обучения требует изменения в организации учебного процесса. Это системный процесс, который должен охватывать всю плоскость обучения (весь курс, весь поток, все направления). Внедрение проектного обучения на отдельных специальностях или направлениях не дает эффекта в перспективе. Эффективная модель проектного обучения представляет собой совместную деятельность преподавателей, внешних экспертов, менторов, заказчиков и студентов. Такая модель направлена на создание уникального продукта и формирование научно-технического за дела.

Рассмотрим две модели обучения, распределенные во времени и имеющие разные подходы. Классическая модель, где практически полностью отсутствует взаимодействие студентов с внешними менторами. Как правило, только студенты старших курсов имеют возможность взаимодействовать с внешними партнерами. Цель такого взаимодействия – выполнение реальных задач под руководством наставников из университета и менторов. В классической модели образования такое взаимодействие называется практикой студентов. Главным минусом такой модели является несоответствие умений и требований, то есть, полученные за время обучения знания и умения не соответствуют компетенциям реальных задач. Необходимость интеграции проектного обучения в университете возникает, когда теоретические знания студентов слабо подкрепляются практическими навыками. Проектный подход подразумевает организацию самоуправляемой деятельности малой группы студентов, обучающихся в процессе реализации конкретного проекта или задачи. Важной особенностью такого процесса является итоговая презентация работы.

Нами разработана и применяется на практике смешанная проектная модель обучения. Процесс полного внедрения проектной деятельности не может быть быстрым. На примере нашего университета мы понимаем, что переход осуществляется поэтапно. С точки зрения образовательной программы, конечную цель внедрения проектного обучения можно сформулировать как «старт-конец». Это подразумевает программу обучения, при которой проектная деятельность внедряется с первого курса и завершается на последнем курсе обучения. При этом выпускная работа студента развивается с первого курса и может иметь тип стартапа. В контексте образовательной программы это называется индивидуальной образовательной траекторией. При таком подходе сохраняется общепринятая модель «перевернутая воронка», когда входными данными являются множество проектных команд, а выходными только несколько успешных команд. Покажем при мер

такого вектора развития проектного обучения. На рис. 1 показана обобщенная схема развития выпускной работы студента (дипломная работа) в динамике.

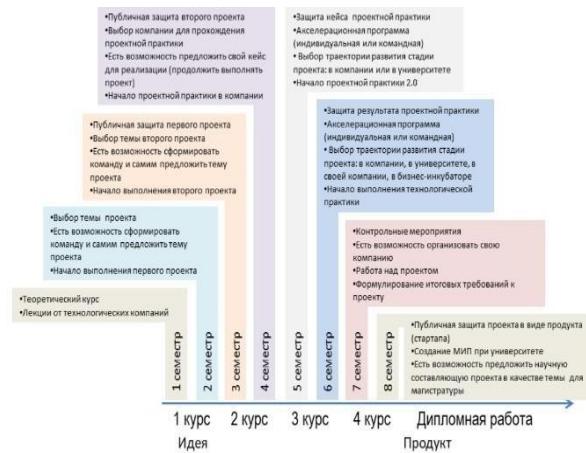


Рис. 1. контрольные точки развития выпускной работы студента при проектном подходе

Программа адаптирована для бакалавриата. Особенностью является то, что внедрение проектного подхода осуществляется с первого семестра.

III. МЕТОДОЛОГИЯ И ПРИМЕРЫ

Рассматривая разные примеры проектов, можно выделить общее: проект не всегда создает или описывает что-то новое. Например, новый подход к существующему решению, метод оптимизации, модификация и т.д. Здесь не всегда подразумевается создание принципиально нового предмета или технологии. Проект может не иметь научных исследований и это важно понимать. Часто проект приводит к новому, социально востребованному результату. Когда мы говорим про проект, на самом деле мы подразумеваем решение проблемы. В этом случае результат – это не просто создание какого-либо устройства. Продуктовый результат проекта – это всегда шаг к решению проблемы. Поэтому мы должны воспринимать итоговый результат именно с точки зрения того, насколько мы приблизились к решению проблемы.

В общем виде выделяют два типа результата выполнения проекта: фактический (продуктовый) результат и образовательный. К продуктовому результату относят: новые знания, устройство или прототип, технологии, инновации. К образовательному – вхождение в контекст профессии, прикладные навыки и компетенции, способы организации работы в проекте, ценности. Продуктовый результат обычно получают в самом конце работы. Образовательный результат меняется на каждом этапе проекта.

A. Кейс проекта «аббитуриант социальной сети»

Рассмотрим пример проекта, который предназначен для студентов первого курса бакалавриата. Студенты самостоятельно выбирают проект (из пула тем) по размещенной в сети университета аннотации. На проект формируется команда от 5 до 8 студентов. Работа над проектом выполняется в течение одного семестра и завершается публичной защитой перед экспертами. Суть проекта заключается в анализе открытого профиля в социальной сети. Анализ профиля позволяет сделать вывод о форми-

рующихся профессиональных интересах владельца аккаунта, активной жизненной стратегии. Данными служат доминирующая направленность сообществ, в которых состоит и регулярно читает пользователь (например, это программирование или информационная безопасность), ключевые слова и тематика его записей, а также факты участия в профильных олимпиадах и конкурсах, волонтерском движении и т.п. Данные фильтруются по возрасту, региону проживания, ключевым словам профессиональных интересов, могут быть сформированы обезличенные списки ссылок на учетные записи потенциальных абитуриентов вуза. Получаемые данные могут быть использованы Университетом для создания узкоспециализированных баз для таргетинга. Продуктовый результат проекта – программный продукт (парсер социальной сети), позволяющий расширить существующие у сети возможности поиска и фильтрации пользователей для подбора потенциальных абитуриентов вуза. Проблема, которую решает проект – расширение географии потенциальных абитуриентов университета. Образовательный результат реализации проекта представлен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

Этап жизненного цикла	Образовательные результаты проекта
Выделение проблем	Понимание проблемного поля инженерной деятельности Способы анализа предметной области, поиска ин-формации, взаимодействия с заказчиком или экс-пертом и т.п.
Формулирование целей, задач	Формулирование гипотезы для исследования Постановка задач, разбиение задач на подзадачи Способы планирования работ, владение ИТ-инструментами планирования и коммуникации (Trello, Miro и др.)
Реализация проекта	Способы организации коммуникации в команде Алгоритмизация (предметные знания и умения из курса информатики) Программирование скриптов в API Программирование на языке Python
Оформление результатов	Написание отчетов по проекту Навыки выступления перед профессиональной аудиторией
Рефлексия	Определение собственного незнания и формулирование запроса на знания Анализ алгоритма собственной работы и его улучшение

Рефлексия образовательных результатов с участием наставника запланирована на всех промежуточных этапах. В роли наставника выступает сотрудник университета. Важную роль играют еженедельные (1–3 раза в неделю) встречи наставника с проектной командой.

Подводя итог формализованному описанию кейса, можно резюмировать, что целью проекта является достижение заявленных продуктовых и образовательных результатов.

IV. ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС

Балансом результатов проекта управляет наставник. Он выбирает, на чем следует сделать акцент. Наставник проекта – это куратор и тьютор в одном лице. Задача куратора – достижение командой продуктового результата. Именно поэтому куратор включен в команду проекта и знает, кто какие задачи решает. Как правило, куратор нужен для того, чтобы подстраховать команду в организации работы над проектом. Куратор помогает команде выстроить рабочий процесс, но не подменяет лидера проекта и не решает за участников их задачи. Главная задача тьютора – образовательный результат проекта. Он должен понимать, кто за что отвечает, у кого какие проблемы, у кого какой прогресс. Тьютор выделяет образовательные результаты, уникальные для каждого участника и для каждого этапа работы над проектом. Наставник движется с командой по жизненному циклу проекта. В идеальном варианте наставник с первого курса обучения сопровождает команду до выпускного курса. При этом проект, который выполняет команда может модифицироваться.

V. ВЛИЯНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ТВОРЧЕСКОГО ПРОЕКТА НА ФИКСАЦИЮ АКТУАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ И УМЕНИЙ. НАУЧНАЯ МОДЕЛЬ.

В типовом учебном процессе последовательно происходит формирование и утрата знаний и умений. Процессы запоминания и забывания в краткосрочной динамике (часы, минуты) экспериментально исследованы слабо. В средней и долгосрочной динамике процессы исследованы достаточно для построения удовлетворительных по точности моделей [2–4].

Рассмотрим типовую модель Риттера для анализа динамики обучения. Расширяя предложенную модель Риттера в направлении анализа не только процессов обучения, но и утраты результатов обучения до уровня остаточных знаний, можно сформировать модель, использующую сумму логистических функций, где $P(t)$ – результат учебного воздействия, измеряемый как вероятность правильного решения простых задач, t – время, коэффициенты a_0 и a_3 определяют максимальное обучение (запоминание) и максимальное забывание, остальные коэффициенты определяют временные характеристики процессов запоминания и забывания.

Для предметов, результат изучения которых используется в дальнейшей учебной, исследовательской и практической деятельности, уровень остаточных знаний будет выше. Реализация курса проектной деятельности, подразумевающего постоянную реализацию новых проектов, обеспечивает достаточно раннее включение механизмов, фиксирующих достигнутые результаты в длительной памяти, для которой нехарактерно быстрое забывание. При этом будут утрачиваться знания, неактуальные для выполнения текущего проекта.

На практике это означает более эффективное запоминание практического курса, ориентированного на систематическое применение теоретического материала. Интенсивное применение проектного обучения обеспечивает

перевод усвоенной информации в область длительной памяти, в область постоянно используемых в практической деятельности умений, навыков и компетенций.

VI. ОПЫТ УСПЕШНОГО НАСТАВНИЧЕСТВА НАД КОМАНДАМИ СТУДЕНТОВ: КЕЙСЫ, МОТИВАЦИЯ УЧАСТИЯ, ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ И ПРОДУКТОВЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

В Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (ИКТИБ ЮФУ) модуль проектной деятельности введен в 2017 году. Прежде чем команда организаторов смогла достичь некоторых успехов и сформировать для университета концепцию внедрения в учебный процесс основ проектной деятельности, был предпринят ряд шагов по реорганизации ключевых подходов использования проектной деятельности в учебном процессе. К ключевым пунктам концепции проектной деятельности в ИКТИБ ЮФУ можно отнести следующее: в проектную деятельность вовлечены все студенты института, обучающиеся на 1-2 курсах; студенты имеют возможность заранее ознакомиться с предлагаемыми темами проектов. Пул проектов формируется из тем, которые предлагаются преподаватели университета, внешние заказчики-партнеры университета или сами студенты. Студенты, которые не выбрали проект, записываются в команды со свободными местами принудительно. Внедрение механизма студенческой инициативы (формулирование темы проекта студентами) значительно повысило популярность проектной деятельности; студенты могут заранее сформировать команду для выполнения проекта, а могут записаться на понравившийся проект и работать со случайными партнерами.

Каждая команда состоит из минимум пяти и максимум восьми студентов. У каждой команды есть наставник из числа преподавателей. Если тему проекта формирует внешний партнер, то представитель заказчика выступает ментором проекта. В этом случае наставник выполняет роль куратора. В случае, когда студенты сами формируют тему проекта, наставник также выступает в роли куратора. Для каждого проекта на этапе формирования темы (этап предложения темы) разрабатывается техническое задание. В процессе выполнения проекта техническое задание может модифицироваться. Если проект продолжают выполнять на более старших курсах, то техническое задание трансформируется под задачи выпускной работы в виде стартапа.

Проекты защищаются в единый день. Защита командная перед экспертной комиссией. В комиссию приглашаются преподаватели университета и представители компаний-партнеров. Оценка проектов осуществляется строго по компетенциям. При этом компетенции соотносятся с учебной программой университета. Команда проекта должна представить законченный продукт для оценки компетентным жюри. Проекты оцениваются по 100-балльной системе. Структура итоговой оценки складывается из командной и индивидуальной составляющей:

а) оценка команде за промежуточные отчеты о выполнении проекта. Команда представляет три отчета за весь период выполнения проекта (например за 6 месяцев), каждый из которых оценивается по 10-ти

балльной шкале. Суммарный балл за три промежуточных отчета может быть в пределах от 0 до 30. Оценивает наставник;

b) оценка команде за оформление и содержание пояснительной записи по проекту (от 0 до 10 баллов). Оценивает наставник. Без пояснительной записи команда к защите не допускается. Понятие пояснительная записка можно толковать как исполнительная документация к проекту;

c) оценка команде за защиту проекта (от 0 до 40 баллов). Оценивает экспертная комиссия;

d) оценка маркетингового анализа и командной работы (от 0 до 10 баллов) выставляется команде, как среднеарифметическое суммы индивидуальных баллов, набранных по дисциплине «Основы проектной деятельности»;

e) оценка индивидуально каждому члену команды от капитана проектной группы (от 0 до 10 баллов). Лидер команды выставляет индивидуальные баллы членам проектной команды. Лидер оценивает работу каждого члена команды. Индивидуальный балл капитану (от 0 до 10 баллов) выставляет наставник.

Бонусные баллы (от 0 до 10 баллов) начисляются за активное участие в проектных мероприятиях, проводимых университетом.

Итоговая оценка за выполнение творческого проекта выставляется индивидуально каждому студенту в форме дифференцированного зачета с учетом всех составляющих (оценки команде и индивидуальные оценки суммируются).

Кто может быть наставником? Наставники проекта проходят отбор в соответствии с предъявляемыми к ним критериями, такими как опыт наставничества, повышение квалификации в области наставничества, научный и педагогический опыт и другое. Наставник проекта самостоятельно формулирует тему проекта, который бы он хотел курировать. Часто тематика проектов наставника связана с его научной деятельностью. Может быть ситуация, когда темой проекта является одна из задач научного гранта. В этом случае руководитель гранта имеет возможность финансово стимулировать проектную команду. Цель наставника заключается не только в том, чтобы команда выполнила проект, но и в том, чтобы раскрыть потенциал команды, выявить талантливых студентов, ориентировать их на развитие проекта в будущем. В регламентирующих документах сформулированы основные задачи наставника: непосредственное руководство проектными командами и контроль выполнения творческих проектов; вовлечение студентов в инновационный процесс; выявление инициативных студентов и их ориентация на совершенствование проектов под руководством наставников для участия в различных инициативных конкурсах; поиск и предложение решений для развития проектной деятельности в университете.

Наставник должен обладать рядом качеств. Мало быть профессионалом своего дела. Для наставника, который руководит проектом важно иметь качества организатора, тонкого психолога, внимательного слушателя. Более того, отношения наставник – команда важно строить таким образом, чтобы, с одной стороны, являться авторитетным лидером, за которым хочется следовать и на которого хочется равняться. А с другой стороны, необходимо иметь доверительные отношения с участниками и участвовать в коммуникации команды на равных, тем самым показывая, что роль наставника отличается от роли преподавателя.

До трех разных команд могут выполнять проект одной тематики. Это сделано для того, чтобы, во-первых, оставить пространство для творческой составляющей в проекте. Во-вторых, между командами существует некоторый соревновательный эффект, что заставляет их работать над проектом еще усерднее. Анализ эффективности выполнения проектов показывает, что с теми студентами, которые изначально мотивированы на выполнение проекта и самостоятельно выбрали тему, обычно не бывает проблем. Такие студенты работают с соблюдением графика, следуют указаниям наставника, успешно выполняют и защищают проект. Сложнее дело обстоит со студентами, которые на момент выполнения проекта теряют связь с учебным процессом. Причины, по которым это происходит, могут быть совершенно разные: проблемы в личной жизни, семейные обстоятельства, нехватка времени, если студент совмещает обучение с работой, природная замкнутость и нежелание работать в коллективе, проблемы с нехваткой знаний для выполнения проекта и даже обыкновенная лень. В этом случае многое зависит от наставника, задача которого понять причины, мешающие студенту работать над проектом и помочь им решить.

VII. Мотивация

Внедрением проектной деятельности должна заниматься команда. У команды должен быть руководитель. Важной особенностью является то, что руководитель должен находиться в прямом подчинении высшего руководящего органа (ректор, декан, директор). Необходимо минимизировать вертикаль управления. Это делается для того, чтобы максимально снизить бюрократические барьеры при реализации проектной деятельности. Мотивацией для наставников и членов рабочей группы может служить материальное стимулирование или включение дополнительной нагрузки в рабочую программу. Приведении механизмов стимулирования, возникает необходимость в установлении контрольных мероприятий. Последнее является весьма неоднозначной и сложной задачей. Это связано с тем, что оценить эффективность результата проектной деятельности в краткосрочной перспективе весьма сложно.

VIII. Выводы

Проводя анализ проектной деятельности нельзя однозначно говорить о каком-либо единобразном эффективном методе. Практика внедрения проектной деятельности показывает положительные результаты всегда, но механизмы внедрения отличаются и зависят от особенностей

системы образования, типа учреждения и даже менталитета людей. Нами рассмотрены общие тенденции изменения в образовательном подходе. Проведен сравнительный анализ классической модели обучения и современных методик. Описан опыт внедрения проектного обучения в конкретном университете и показаны некоторые результаты после двух лет применения. Рассмотрены особенности интеграции проектных методов в классическое обучение. Показана схема организации проектного направления в университете. Приведена методика образовательного процесса с использованием проектного обучения студентов в высшей школе и университете. Показаны примеры проектных решений для отдельных образовательных курсов. Проведен анализ эффективности рассмотренного метода с точки зрения получения студентами новых компетенций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Плёнкин Антон Павлович, Федотова Анна Юрьевна, Познина Наталья Анатольевна, Самойленко Валерия Сергеевна. Практика внедрения проектной деятельности // Всероссийская конференция "Системный синтез и прикладная синергетика". – Ростов-на-Дону: 2019.*
2. *Ritter F.E., & Schooler L.J. The learning curve. In International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences (2002), 8602-8605. Amsterdam: Pergamon.*
3. *Левицкая Л.П., Моргунов В.М. Моделирование процесса обучения ученика персонала // Экономика железных дорог. – 2007. – № 3.*
4. *Салливан Б., Томпсон Х. Эффект плато. Как преодолеть застой и двигаться дальше: пер. с англ. Павла Миронова. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. – 320 с.*

Секция VII

**УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ
ПАРАМЕТРАМИ**

DOI: 10.18522/syssyn-2021-56

**Проектирование распределенной системы
управления кустом скважин**

Першин Иван Митрофанович

Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский федеральный университет
Пятигорск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru

Цаплева Валентина Викторовна

Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский федеральный университет
Пятигорск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru

Малков Анатолий Валентинович

ООО «Нарзан-гидроресурсы,
Кисловодск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru

Помеляйко Ирина Сергеевна

ООО «Нарзан-гидроресурсы,
Кисловодск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru

Аннотация. В статье рассматривается синтез распределенных систем управления гидролитосферными процессами с использованием результатов опытно-фильтрационных работ. Показано определения параметров звена, аппроксимирующего удельное понижение уровня. Показана верификация математических моделей, описывающих гидролитосферные процессы, процедура определения оптимального числа скважин и синтез распределенной системы управления. Приводятся результаты моделирования работы замкнутой распределенной системы управления.

Annotation. The article considers the synthesis of distributed control systems for hydrolithospheric processes using the results of experimental filtration work. The determination of the parameters of the link approximating the specific level decrease is shown. The verification of mathematical models describing hydrolithospheric processes, the procedure for determining the optimal number of wells and the synthesis of a distributed control system are shown. The results of modeling the operation of a closed distributed control system are presented.

Ключевые слова: опытно-фильтрационные исследования, распределенные системы, гидролитосферные процессы.

Keywords: experimental filtration studies, distributed systems, hydrolithospheric processes.

**I. ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СЕВЕРНОГО ФЛАНГА КИСЛОВОДСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД**

Опытно-фильтрационные исследования были проведены по кусту скважин № 107Д (возмущающая) и двум наблюдательным: № 87 на нижневаланжинский водоносный подгоризонт, и № 107 – на верхний водоносный подгоризонт, удаленные от возмущающей скважины № 107-Д на 180 м. (рис. 1).

Общая продолжительность ОФР составляла 10 суток. Средний дебит скважины составлял 508 м³/сут.

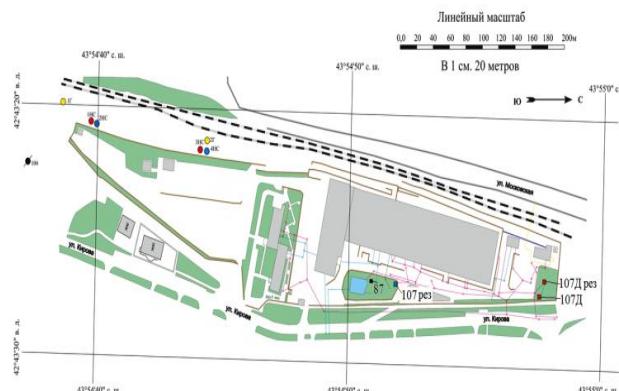


Рис. 1. Схема расположения скважин Северного фланга Кисловодского месторождения минеральных вод

Интерпретация данных ОФР проводилась с использованием графоаналитического метода. Параметры, снятые с графика временного прослеживания по 331КВ. № 87, следующие: $A_2 = 0,0024$; $C_2 = 0,00125$; $km_2 = 146,4 \text{ м}^2/\text{сут}$; $a^*_2 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$; $\mu^* = 0,00012$.

Входное воздействие – средний дебит возмущающей скважины № 107Д, функция выхода – изменение уровня в скважин № 107Д и № 87. Расстояние между рассматриваемыми скважинами составляет 180м. Определим статические коэффициенты передачи: K_1 =удельное понижение скважины (понижение уровня в скв.№ 107Д/средний дебит)=(12.5-1.11)/508=0.0224; K_2 =коэффициент гидравлического взаимодействия скважин (понижение уровня в скв. № 87/средний дебит)=(8.2-7)/508=0.00236.

П. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕНА, АППРОКСИМИРУЮЩЕГО УДЕЛЬНОЕ ПОНИЖЕНИЕ УРОВНЯ В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ

В рассматриваемом случае имеется одно входное воздействие и две функции выхода (см. рис. 1). По сути, рассматривается условно сосредоточенная система [1]. В [2-6] показано, что удельного понижения уровня в заданной точке описывается аппроксимирующим звеном:

$$W_\alpha = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r), \beta = (D)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где D, K, α – определяемые параметры, r – расстояние от возмущающей скважины до измеряемой точки.

Процедура определения параметров рассматриваемого звена состоит из следующих этапов:

1) Записывая (1) при $r=r_0$, $r=r_2$ и приравнивая K_1 и K_2 , получим:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0) \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_2), \beta = (D)^{1/2} \end{cases} \quad (2)$$

2) Подставляя вычисленные значения: $K_1=0.0224$; $K_2=0.00236$; $r_0=0.2$; $r_2=180$ в (2), получим систему:

$$\begin{cases} 0.0224 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 0.2) \\ 0.00236 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 180), \beta = (D)^{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3), придем к следующему результату: $K=0.00028106$; $D=0.00015665$.

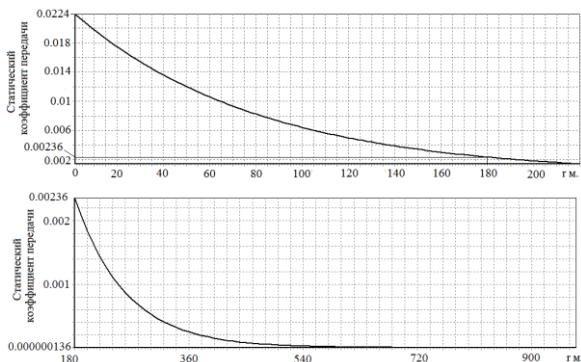


Рис. 2. График коэффициента гидравлического взаимодействия скважин

3) Коэффициента гидравлического взаимодействия скважин рассматриваемого объекта записывается в виде:

$$W_\alpha = \frac{0.00028106}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r), \quad \beta = (0.00015665)^{\frac{1}{2}}, \quad r_0 \leq r. \quad (4)$$

На рис. 2 показан график коэффициента гидравлического взаимодействия скважин, при изменении r .

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

Схема рассматриваемого месторождения приведена ниже.

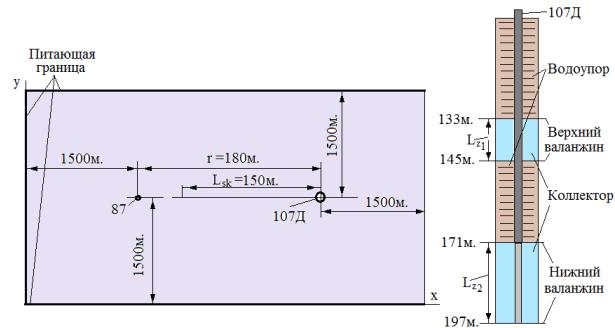


Рис. 3. Схема расположения скважин

Постановка задачи оптимизации числа добывающих скважин

Определим число добывающих скважин (n), при котором прибыль (ДД) за десять лет эксплуатации месторождения будет максимальной. При этом заданы: $r_{0,i} = 0.2\text{м.}$; $N=300/1000000$ млн. руб.(стоимость 1м^3 гидроминерального сырья); $C_p=6$ млн. руб.(затраты на обустройство и содержание скважины в течение указанного срока); налог на недропользование 7.5%; постоянные расходы (Пр= 87млн. руб.); расположение добывающих скважин показано на рис. 3, ($L_{sk}=150\text{м.}$); заданное понижение уровня в скважинах составляет 12м.; полученный ранее коэффициента гидравлического взаимодействия скважин записывается в виде:

$$W_\alpha = \frac{0.00028106}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r), \quad \beta = (0.00015665)^{\frac{1}{2}}, \quad r_{0,i} \leq r$$

Процедура решения поставленной задачи распадается на следующие этапы:

1) Влияние j -й добывающей скважины на понижение уровня в μ -добывающей скважине описывается следующим соотношением:

$$\Delta H_\mu = \frac{K_\mu \cdot Q_\mu}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (r_{0,\mu})) + \sum_{j=1, j \neq \mu}^n \frac{K_j \cdot Q_j}{\beta} \exp(-\beta \cdot (r_{\mu,j})), \quad \beta = (G_1)^{1/2}, (\mu = 1 \dots n), \quad (5)$$

где ΔH_μ – понижение уровня в μ -й скважине ($\mu=1 \dots n$); $r_{0,j}$ – радиус колодца [4]; $r_{\mu,j}$ – расстояние между μ -й и j -й скважинами; n – количество скважин; Q_μ , Q_j – дебиты скважин.

Обозначая

$$C_\mu = \frac{K_\mu}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (r_{0,\mu})), C_{\mu,j} = \frac{K_j}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (r_{\mu,j})),$$

$$\beta = (G_1)^{1/2}$$

и записывая (5) в матричном виде, получим:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1, C_{1,2}, \dots, C_{1,n} \\ C_{2,1}, C_2, \dots, C_{2,n} \\ \dots \\ C_{n,1}, C_{n,2}, \dots, C_n \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \dots \\ \Delta H_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) Определим суммарный дебит (Q):

$$Q = \sum_{\mu=1}^n Q_\mu.$$

3) Прибыль за указанный срок эксплуатации месторождения составит:

$$\text{ДД} = (Q \cdot N - Q \cdot N \cdot 0.075) \cdot 3650 - C_p \cdot n - \text{Пр.}$$

Была составлена программа для расчета ДД при изменении числа добывающих скважин. Результаты расчетов приведены на рис. 4. В результате расчетов получено, максимальная прибыль (за рассматриваемый срок эксплуатации) составляет 1016,8 млн. руб., и достигается при использовании 5 добывающих скважин. Расстояние между добывающими скважинами составляет 37,5 м.

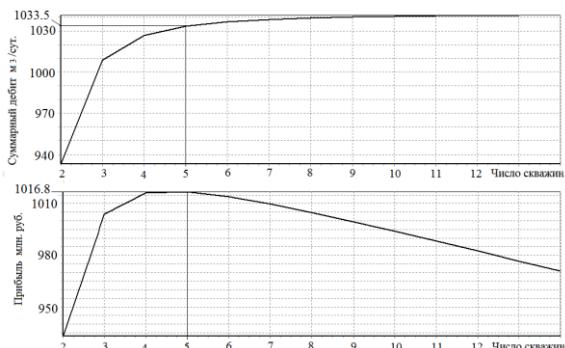


Рис. 4. Оптимизация числа добывающих скважин

IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Математическая модель рассматриваемого процесса (см. рис. 3) записывается в виде [1, 7]:

Верхний валанжин

$$\frac{\partial H_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_1} \left(k_{1,x} \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \frac{\partial^2 H_1(x, y, z, \tau)}{\partial z_1^2} \right),$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_{z_1}.$$

Нижний валанжин

$$\frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_2} \left(k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z_2^2} \right) + V \cdot \delta(x_0, y_0)$$

$$0 < x < L_x; 0 < y < L_y; 0 < z < L_{z_2}$$

где H_i – напор i -м водоносном горизонте ($i=1,2$); $k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$ – коэффициенты фильтрации i -го пласта ($i=1,2$); η_i – упругоемкость; $V=Q \cdot K_\phi$ – функция, отражающая воздействие дебита (Q) на напор, K_ϕ – заданный коэффициент; $\delta(x_0, y_0)=1$, если $x=x_0, y=y_0$, $\delta(x_0, y_0)=0$ если $x \neq x_0, y \neq y_0$; τ – время.

Условия между пластами (условия Дарси):

$$H_1(x, y, L_{z_1}, \tau) = H_1(x, y, L_{z_1}, \tau) + b_1 \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - H_1(x, y, L_{z_1}, \tau)) \cdot \partial \tau,$$

$$H_2(x, y, 0, \tau) = H_2(x, y, 0, \tau) - b_1 \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - H_1(x, y, L_{z_1}, \tau)) \cdot \partial \tau,$$

b_1 – параметр перетекания.

Состояние напора на границах записывается в виде:

$$\frac{\partial H_1(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial H_2(x, y, L_{z_2}, \tau)}{\partial z} = 0,$$

$$H_1(0, y, z, \tau) = H_{1,0}; H_2(0, y, z, \tau) = H_{2,0},$$

$$\frac{\partial H_1(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0; \frac{\partial H_2(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0$$

$$H_i(x, 0, z, \tau) = H_i(x, L_y, z, \tau) = H_{i,0}(x, y, z, \tau), (i = 1,2)$$

где $H_{1,0}, H_{2,0}$ – состояния невозмущенных пластов.

$$H_{1,0}(x, y, z, 0) = 193 - 50 \cdot \frac{x}{L_x},$$

$$0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_{z_1}$$

$$H_{2,0}(x, y, z, 0) = 193 - 50 \cdot \frac{x}{L_x},$$

$$0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y, 0 \leq z \leq L_{z_2}$$

Геометрические параметры рассматриваемого процесса приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ЗНАЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА

Обозначения	Размер, м.
Длина моделируемой области	L_x
Текст таблицы	L_y
Толщина I пласта	L_{z_1}
Толщина II пласта	L_{z_2}

По данным геологоразведочных работ были определены численные значения физических параметров, рассматриваемого процесса (табл. 2) (значения параметров приведены в системе «СИ»).

ТАБЛИЦА 2. ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА

Верхний пласт	Нижний пласт
$kx1=148.4/86400;$ $ky1=24.64/86400;$ $kz1=14.64/86400;$ $\eta1:=0.00012$	$kx2=148.4/86400;$ $ky2=24.64/86400;$ $kz2=14.64/86400;$ $\eta2:=0.00012;$ $b1:=0.00128/86400$

Записывая математическую модель в дискретном виде, составим программу, моделирующую рассматриваемый процесс. При этом, число точек дискретизации было задано в виде:

$$x \rightarrow \eta = 1..107; y \rightarrow \gamma = 1..76; z_i \rightarrow \xi = 1..9; i = 1, 2.$$

Добывающая скважина располагается в нижнем пласте и моделируется с использованием следующих точек дискретизации: $\eta = 50; \gamma = 38$.

Измерение функции выхода ($H_{2,\eta,\gamma,\xi}(t)$) осуществляется в точке: $\eta = 45; \gamma = 38; \xi = 5$.

V. ВЕРИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Под верификацией дискретной модели будем полагать достижение близости статических и динамических характеристик, полученных по результатам ОФР и статических и динамических характеристик дискретной модели. Статические характеристики, полученные экспериментальным путем (ОФР): коэффициенты передачи $K_1=0.0224$; $K_2=0.00236$. В результате экспериментальных исследований получено, что чистое запаздывание возмущения от добывающей скважины 107Д до контрольной скважины 87 составляет 27 минут. Подкорректируем параметры дискретной модели для достижения близости статических и динамических характеристик, полученных в результате ОФР. Скорректированные параметры объекта приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. ЗНАЧЕНИЯ СКОРРЕКТИРОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА

Верхний пласт	Нижний пласт
$kx1=148.4/86400;$ $ky1=14.64/86400;$ $kz1=14.64/86400;$ $\eta1:=0.000128$	$kx2=148.4/86400;$ $ky2=7.34/86400;$ $kz2=3.95/86400;$ $\eta2:=0.0008; b1:=0.000012/864$

$$K_\phi = 20.51747163.$$

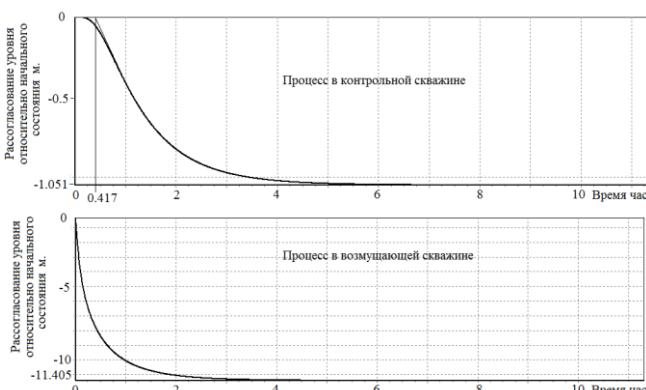


Рис. 5. Переходные процессы в скорректированной модели

Коэффициенты передачи скорректированной модели (см. рис. 5): $K_1=11.405/508=0.02245$; $K_2=1.051/508=0.002069$; время запаздывания возмущения от добывающей скважины 107Д до контрольной скважины 87 составляет 0.417 ч.(25 минут). Полученные значения параметров близки значениям, полученным в результате ОФР.

VI. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕБИТОМ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН

Методика проектирования распределенной системы управления состоит из следующих этапов [1, 8–21]:

1) Выбор пространственных мод.

Как известно [1–4], при определении статических и динамических характеристик распределенного объекта используют пространственные модели (собственные вектор-функции оператора объекта).

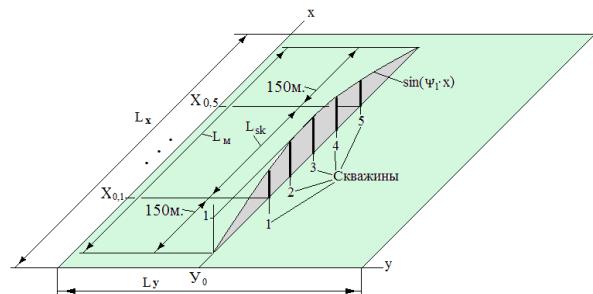


Рис. 6. Формирование моды входного воздействия

Натурные эксперименты показывают, что на расстоянии 150 м. от скважины, возмущающее воздействие можно прировнять нулю (статический коэффициент равен 0.00343, что составляет $0.00343/0.0224=0.15$ часть от статического коэффициента возмущающей скважины). Сформируем пространственные моды входного воздействия в виде: $\sin(\psi_v \cdot x)$, $0 \leq x \leq L_M$, где $\psi_v = \pi \cdot \frac{v}{L_M}$, $L_M = 450$ м. (см. рис. 6)

2) Определение характеристик рассматриваемого объекта

Формирование моды входного воздействия показано на рисунке 6 (формирование первой моды ($v = 1$)). Запишем в виде дискретной функции, входное воздействие на объект (функция(V)):

$$V_\mu(X_\mu, Y_0, \tau) = -K_\phi \cdot Q \cdot \sin(\psi_v \cdot x) \cdot \delta(X_\mu, Y_0, \tau), \mu = 1..5,$$

где X_μ, Y_0 – координаты расположения добывающих скважин (см. рис. 6); (знак « δ » указывает на то, что осуществляется забор гидроминерального сырья из рабочей скважины).

При моделировании гидролитосферного процесса необходимо учесть, что дебит каждой скважины распределяется по всей толщине используемого пласта (реализован совершенный водозабор). В качестве функций выхода выберем изменение уровня в зонах расположения добывающих скважин, в точках $x=X_\mu$, $y=Y_0, z=0.5 \cdot L_{Z2}$ (см. рис. 2). Используя верифицированную дискретную модель объекта управления, была составлена программа для

проведения численных экспериментов и получены реакции объекта первую и вторую моды входного воздействия, приведенные на рис. 7, рис.8 ($Q=-100 \text{ м}^3/\text{сут.}$, или $Q = -0.001157 \text{ м}^3/\text{сек.}$).

$$K_{M1} = -5.987 / (-0.001157) = 5355.1$$

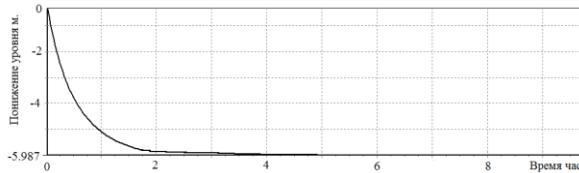


Рис. 7. График изменения уровня в зоне расположения третьей добывающей скважины

На рис. 8. приведен график изменения уровня в зоне расположения третьей добывающей скважины ($x = X_3$, $y = Y_0$, $z = 0.5 \cdot L_{Z2}$), при гармоническом входном воздействии

$$\begin{aligned} V_\mu(X_\mu, Y_0, \tau) &= -K_\phi \cdot Q \cdot \sin(\psi_v \cdot x) \cdot \sin(\omega \cdot \tau) \cdot \\ &\delta(X_\mu, Y_0, \tau), \mu = 1..5, \omega = 0.001 \text{ 1/сек.} \end{aligned}$$

Период $T = 2\pi/\omega = 2\pi/0.001 = 6283.18 \text{ с} = 104.72 \text{ м.}$ Фазовый сдвиг: $\Delta\phi_1 = 2\pi(-17.19)/104.72 = -1.0314 \text{ рад.}$

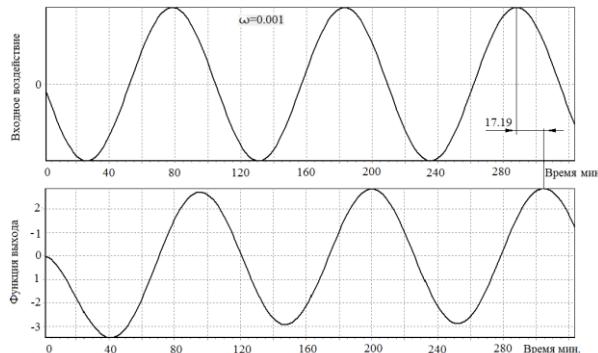


Рис. 8. График изменения уровня в зоне расположения третьей добывающей скважины

На рис. 9, приведен график реакции объекта на вторую пространственную моду. Определим значение $K_{M2} = -2.068 / (-0.001157) = 2063.9$.



Рис. 9. График изменения уровня в зоне расположения первой добывающей скважины

3) Аппроксимация статических и динамических характеристик объекта

Для описания статических и динамических характеристик используем аппроксимирующие звенья вида [5–11]:

$$\begin{aligned} W_\alpha(s, G) &= \frac{K}{\beta + 1} \cdot \exp(-\beta \cdot \Delta r), \beta = \\ &\left(\frac{s}{\alpha} + G \right)^{\frac{1}{2}}, \quad G_1 \leq G \leq \infty. \end{aligned} \quad (7)$$

где G – обобщенная координата. В рассматриваемом случае, для выбранных пространственных мод, первой и второй, значения обобщенной координаты соответственно: $G_1 = (\pi \cdot \frac{1}{L_M})^2$; $G_2 = (\pi \cdot \frac{2}{L_M})^2$

$\Delta r, K, \alpha$ – определяемые параметры.

Записывая (7) при $s = j\omega = 0$, для выбранных пространственных мод, получим:

$$\begin{cases} K_{M1} = \frac{K}{\beta_1 + 1} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot \Delta r) \\ K_{M2} = \frac{K}{\beta_2 + 1} \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \Delta r) \end{cases} \quad \beta_v = (G_v)^{1/2}, v = 1,2. \quad (8)$$

Подставляя исходные данные (K_{M1}, K_{M2}, G_1, G_2) в систему уравнения (7) и решая, придем к следующему результату:

$$K = 13895.282935; \Delta r = 135.58229; \alpha = 6.441693.$$

Полагая в (7), $s = j\omega$ ($\omega = \omega_1$), и преобразуя, получим:

$$\Delta f_1 = -Im(\beta_1) \cdot \Delta x - \arctan(Im(\beta_1))/(Re(\beta_1) + 1)), \beta_1 = (j\omega_1 \alpha + G_1) \cdot 2. \quad (9)$$

Подставляя в (9) значения $\Delta f_1 = \Delta \phi_{M1} = -1.0314$, $\omega_1 = 0.001$ и решая, придем к следующему результату: $a = 6.441693$.

Передаточная функция звена (7), для рассматриваемого процесса, записывается в виде:

$$\begin{aligned} W_\alpha(s, G) &= \frac{13895.28}{\beta + 1} \cdot \exp(-\beta \cdot 135.58), \\ \beta &= \left(\frac{s}{6.44} + G \right)^{\frac{1}{2}}, \quad G_1 \leq G \leq \infty \end{aligned} \quad (10)$$

4) Синтез распределенного регулятора.

Постановка задачи: для системы объектом, передаточная функция которого имеет вид (8), синтезировать распределенный регулятор вида [4, 7, 8]:

$$\begin{aligned} W(x, s) &= E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + \\ &E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot s, \end{aligned} \quad (11)$$

(где E_i – заданные числа ($i=1,2,4$); x – пространственная координата; ∇^2 – лапласиан; s – оператор Лапласа; n_i – весовые коэффициенты ($i=1,2,4$), $n_1 \geq 1$.)

при соблюдении следующих ограничений: $\Delta\varphi \geq \pi/6$, $\Delta L \geq 10 \text{ дБ}$, параметр $\Delta = 1.7$.

Частотная методика синтеза распределенных регуляторов изложена в [4, 7, 8].

Методика синтеза реализована в программном продукте кафедры систем управления и информационных технологий Пятигорского института (филиал) СКФУ.

В результате расчета были определены значения параметров распределенного регулятора:

$$n_1 = 1.0, E_1 = 7.7568, n_4 = 1.0, E_4 = 0.011606, n_2 = \infty, E_2 = 0.14142.$$

Синтезированный распределенный регулятор записывается в виде:

$$W(x, s) = 7.7568 \cdot [-\nabla^2] + 0.011606 \cdot [-\nabla^2] \cdot \frac{1}{s} + 0.14142 \cdot s, X_{0,1} \leq x \leq X_{0,5}$$

5) Анализ устойчивости замкнутой распределенной системы.

Записывая передаточную функцию распределенного регулятора с использованием обобщенной координаты, получим:

$$W(G, s) = 7.7568[G] + 0.011606 \cdot [G] \cdot \frac{1}{s} + 0.14142 \cdot s, G_1 \leq G \leq \infty. \quad (12)$$

Структурная схема системы управления рассматриваемым гидролитосферным процессом приведена на рис. 10.

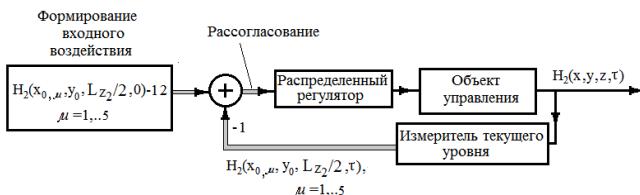


Рис. 10. Структурная схема системы управления гидролитосферным процессом

Синтезированный выше распределенный регулятор записывается в виде:

$$W(x, s) = 7.7568 \cdot [-\nabla^2] + 0.011606 \cdot [-\nabla^2] \cdot \frac{1}{s} + 0.14142 \cdot s, X_{0,1} \leq x \leq X_{0,5}$$

Подавая на вход регулятора воздействие

$$\Delta \hat{H}_\mu(\tau) = \left(H_2 \left(x_{0,\mu}, y_0, \frac{L_{z2}}{2}, \tau = 0 \right) - 12 \right) - H_2 \left(x_{0,\mu}, y_0, \frac{L_{z2}}{2}, \tau \right), \mu = 1..5,$$

получим

$$Q_\mu(\tau) = 7.7568 \cdot \left[-\frac{\Delta \hat{H}_{\mu-1}(\tau) - 2 \cdot \Delta \hat{H}_\mu(\tau) + \Delta \hat{H}_{\mu+1}(\tau)}{\Delta x^2} \right] + \\ + 0.011606 \cdot \int_{\tau} \left[-\frac{\Delta \hat{H}_{\mu-1}(\tau) - 2 \cdot \Delta \hat{H}_\mu(\tau) + \Delta \hat{H}_{\mu+1}(\tau)}{\Delta x^2} \right] + \\ + 0.14142 \cdot \frac{\Delta \hat{H}_\mu(\tau) - \Delta \hat{H}_\mu(\tau - \Delta \tau)}{\Delta \tau}, \quad \mu = 1..5. \quad (13)$$

где $\Delta \tau$ – шаг интегрирования по времени.

Для обеспечения пространственная совместимость распределенных объектов и распределенных регуляторов [4], выбираем граничные условия для (13) в виде:

$$\Delta \hat{H}_0(\tau) = 0; \Delta \hat{H}_6(\tau) = 0.$$

6) Моделирование работы системы управления гидролитосферным процессом.

Дискретная модель объекта управления приведена выше. Добавим к алгоритму вычисления функции напора в нижнем валанжине дискретную модель вычисления функции $V_{2,y}$.

Нижний валанжин

$$\delta(\eta, \gamma) = 0; \text{if } \eta = X_{0,\mu} \text{ then} \\ \text{if } \gamma = Y_0 \text{ then begin } \delta(\eta, \gamma) = 1; \\ V_{2,y} = -K_\Phi \cdot \left(7.7568 \cdot \left[-\frac{\Delta \hat{H}_{\gamma-1}(\tau) - 2 \cdot \Delta \hat{H}_\gamma(\tau) + \Delta \hat{H}_{\gamma+1}(\tau)}{\Delta x^2} \right] \right. \\ \left. + 0.011606 \cdot \int \left[-\frac{\Delta \hat{H}_{\gamma-1}(\tau) - 2 \cdot \Delta \hat{H}_\gamma(\tau) + \Delta \hat{H}_{\gamma+1}(\tau)}{\Delta x^2} \right] \right. \\ \left. + 0.14142 \cdot \frac{\Delta \hat{H}_\gamma(\tau) - \Delta \hat{H}_\gamma(\tau - \Delta \tau)}{\Delta \tau} \right); \text{end}; \\ \frac{\Delta H_{2,\eta,\gamma,\xi}}{\Delta \tau} = \frac{1}{\eta_2} \left(k_{2,x} \frac{H_{2,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta+1,\gamma,\xi}}{(\Delta x)^2} + \right. \\ \left. + k_{2,y} \frac{H_{2,\eta,\gamma-1,\xi} - 2 \cdot H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta,\gamma+1,\xi}}{(\Delta y)^2} + \right. \\ \left. + k_{2,z} \frac{H_{2,\eta,\gamma,\xi-1} - 2 \cdot H_{2,\eta,\gamma,\xi} + H_{2,\eta,\gamma,\xi+1}}{(\Delta z_2)^2} \right) + V_{2,y} \cdot \delta_{\eta,\gamma,\xi}; \\ 2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1; 2 < \xi < N_{z_3} - 1;$$

где N_x, N_y, N_{z_3} – число точек дискретизации по координатам x, y, z соответственно.

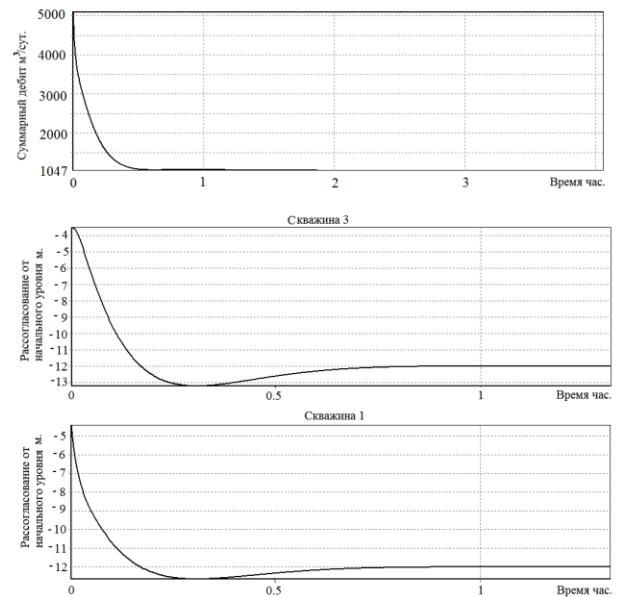


Рис. 11. Графики переходного процесса

По результатам моделирования системы управления (см. рис. 10), построены графики переходного процесса в первой и третьей добывающих скважинах (в точках $x=X_1; y=Y_0; z=0.5 L_{z2}; x=X_3; y=Y_0; z=0.5 L_{z2}$), приведенные на рис. 11. Аналогичные графики могут быть получены и для других скважин.

На рис. 12 приведены дебиты добывающих скважин в установившемся режиме. Рассмотренная распределенная сеть управления достаточно эффективно управляет гидролитосферным процессом.

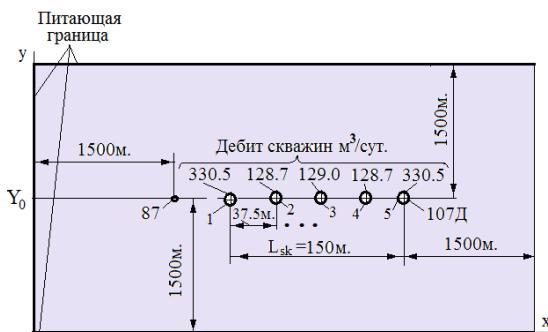


Рис. 12. Схема расположения добывающих скважин

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Першин И.М., Веселов Г.Е., Малков А.В., Першин М.И. Коррекция дискретных математических моделей распределенных объектов // IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов. Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 139-150.
2. Першин И.М., Русак С.Н., Цаплева В.В. Оценка влияния шага дискретизации математических моделей распределенных объектов на динамические характеристики // IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов. Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 161-168.
3. Першин М.И. Особенности распределенных объектов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Университетская наука – региону» (3-21 апреля). – Пятигорск: Изд-во ПФ СКФУ, 2017. – Т. 1. – С. 138-143.
4. Малков А.В., Першин М.И., Помеляйко И.С. и др. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод // Системный анализ, диагностика, прогноз и управление. – М.: Наука 2015. – 283 с.
5. 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.
6. Першин И.М., Малков А.В., Криштал В.А. Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды региона КМВ // Современная наука и инновации. – 2013. – № 1 (1). – С. 17-23.
7. Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies. Cep. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017. – P. 032029.
8. Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. Selection of optimal number of extracting wells // Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies. Cep. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017. – P. 032030.
9. Веселов Г.Е., Першин М.И., Першин И.М. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. – 2015. – С. 106-117.
10. Drovosekova T.I., Pershin I.M. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazkiye Mineralnye Vody (caucasus mineral springs) // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. – 2016. – Р. 215-217.
11. 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.

Исследование установки производства водорода как объекта управления

Абрамкин Сергей Евгеньевич

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
seabramkin@etu.ru

Душин Сергей Евгеньевич

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Санкт-Петербург, Россия
dushins@yandex.ru

Аннотация. Цель исследования – повышение эффективности управления установкой производства водорода. Задачи исследования: анализ управляемых процессов установки производства водорода; разработка математических моделей объектов управления; исследование методов управления технологическими процессами на основе математических моделей. В результате на данном этапе произведен анализ управляемых процессов установки производства водорода; разработана математическая модель аппарата воздушного охлаждения водорода.

Annotation. The purpose of the study is to increase the efficiency of control of a hydrogen production unit. Research objectives: analysis of controlled processes of a hydrogen production unit; development of mathematical models of control objects; research of methods of control of technological processes based on mathematical models. As a result, at this stage, the analysis of the controlled processes of the hydrogen production unit was carried out; a mathematical model of the condenser of hydrogen has been developed.

Ключевые слова: водород, объект управления, аппарат воздушного охлаждения, математическая модель, дифференциальные уравнения в частных производных.

Keywords: hydrogen, control object, condenser, mathematical model, partial differential equations.

I. ВВЕДЕНИЕ

Нефтеперерабатывающая промышленность России осуществляет переработку приблизительно 51 % от объема добываемых жидких углеводородов. Она развивается благодаря структурным и технологическим изменениям, связанным с модернизацией отрасли. Структура производства и качество нефтепродуктов во многом зависят от технологического перевооружения, модернизации оборудования и технологических процессов (ТП). Также постоянно ужесточаются требования и нормы по качеству сырья и продуктов переработки углеводородов.

Одним из направлений развития нефтепереработки является совершенствование производства синтез-газа и водорода из углеводородного сырья. Это связано с широким внедрением в нефтепереработку ТП, потребляющих водород. Например, синтез-газ применяется для синтеза аммиака, метанола и высших спиртов [1–7].

Вообще областью применения водорода является «downstream», т.е. транспортировка, переработка и использование его энергии.

Отметим, что в свободном виде водород отсутствует, он является продуктом производства. Он не источник энергии. По сути, водород – это средство преобразования других источников энергии в химическую.

В исследовании анализируется производство водорода с применением реакции парового риформинга между паром и углеводородами. Особенностью данного ТП является то, что легкое сырье дает эндотермический эффект, а тяжелое – экзотермический.

Анализ процесса парового риформинга показал, что в целом его можно определить, как объект с распределенными параметрами. Основным параметром, изменяющимся по всей технологической цепочке, является температура. Это обуславливает назначение температуры в качестве управляемой переменной.

II. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

Производство водорода состоит из следующих стадий (рис. 1) [8]:

- подготовки сырья;
- очистки сырья;

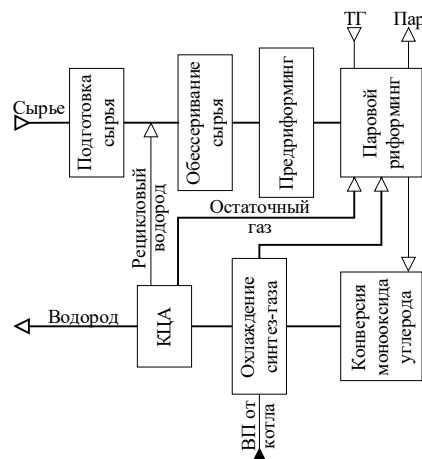


Рис. 1. Структурная схема процесса парового риформинга

- предриформинга;
- риформинга;
- изотермической конверсии монооксида углерода и охлаждения синтез-газа;
- очистки водорода.

На схеме приняты следующие обозначения: ТГ – топливный газ; ВП – вода питательная; КЦА – короткоцикловая адсорбция.

Одним из способов получения водорода является паровой риформинг между паром и углеводородами. Реакция риформинга в случае применения легкого сырья дает эндотермический эффект, а тяжелого – экзотермический. В случае эндотермической реакции, ее протеканию с точки зрения термодинамики способствует высокая температура. Эта реакция осуществляется с применением никелевого катализатора в трубах, расположенных в радиантной зоне печи риформинга. Затем, после охлаждения до заданной температуры, монооксид углерода, образовавшийся во время реакций риформинга, восстанавливается не прореагировавшим паром в реакторе конверсии монооксида углерода. При этом получается углекислый газ и дополнительный водород. Далее поток неочищенного водорода охлаждается и очищается в процессе короткоциклической безнагревной адсорбции.

Выше сказано, что в процессе может применяться как легкое, так и тяжелое сырье. В связи с этим для подготовки сырья к основному ТП перед печью риформинга установлен блок предриформинга, который позволяет снизить нагрузку на пещь риформинга и повысить термическую эффективность основного ТП. Это особенно заметно при использовании тяжелого сырья. Так же применение блока предриформинга позволяет защитить катализатор риформинга, увеличивая продолжительность его рабочего цикла.

В процессе предриформинга метан подвергается паровому риформингу, а более тяжелые углеводороды преобразуются в метан или сразу участвуют в паровом риформинге.

Так как в данном процессе реакции могут быть экзотермическими, эндотермическими и в высокой степени эндотермическими, то может наблюдаться повышение или снижение общей температуры в реакторе.

Анализ ТП показывает, что основные аппараты, входящие в его состав, осуществляют тепло- и массобменные процессы.

Теплообменные процессы осуществляются в теплообменниках с теплосъемом через стенку.

A. Подготовка сырья

Водородсодержащий газ (ВСГ) с давлением 2,45 МПа и температурой 85 °C первоначально поступает в теплообменник Т27 блока подготовки сырья. Здесь он охлаждается обратной водой до температуры 40 °C.

Далее ВСГ поступает в сепаратор С23, где из него извлекается углеводородный конденсат. В нем поддерживается материальный баланс с помощью системы регулирования уровня углеводородного конденсата.

Из С23 поток ВСГ поступает на КЦА-2. Здесь в адсорберах осуществляется массообменный процесс между ВСГ и цеолитом с целью восстановления качества водорода. Затем восстановленный водород подается на прием компрессора К2. В этом процессе с помощью хроматографа контролируется качество водорода.

Еще один продукт адсорбции – отдувочный газ с температурой 40 °C направляется в емкость остаточного газа и далее в сепаратор сырьевого газа С8, установленного на входе компрессора К1. В процессе компримирования происходит нагрев отдувочного газа. Поэтому с линии нагнетания К1 отдувочный газ подается в концевой теплообменник Т14, где охлаждается обратной водой до температуры 40 °C и направляется в газосепаратор С10 для отделения возможных сконденсировавшихся капель жидкости. Из С10 отдувочный газ направляется в адсорбер А2, на очистку от сероводорода 10 % водным раствором моноэтаноламина.

В А2 осуществляется поддержание материального баланса с помощью систем регулирования расхода и уровня моноэтаноламина.

Очищенный от сероводорода отдувочный газ с верха А2 поступает в сепаратор С20, установленный на входе компрессора К3. Компрессор К3 подает отдувочный газ на смешение с основным потоком сырья.

B. Очистка сырья

Сырьевая смесь (отдувочный газ от К3, гексановая фракция, пропан-бутановая фракция) поступает на нагрев в теплообменник Т4. Для получения требуемого содержания углерода в поток сырьевой смеси от компрессора К2 подается рецикловый водород.

Нагрев сырьевой смеси осуществляется Т4 с помощью питательной воды и в Т5 – перегретым водяным паром.

Так же в случае использования в качестве сырья жидкой фазы нагрев осуществляется в испарителе И19, в котором в качестве теплоносителя применяется питательная вода от котла-utiлизатора.

Затем нагретый сырьевой газ направляется в гидрогенизатор Р1 для осуществления процесса гидрогенизации ненасыщенных углеводородов и превращения возможных следов органической серы в сероводород.

Из реактора Р1 сырьевой поток направляется в адсорбера серы Р2. Адсорбера могут работать как последовательная, так и параллельно.

В этом блоке осуществляется регулирование:

- расхода рециклового водорода с коррекцией по процентному соотношению водорода в потоках очищенного и неочищенного сырьевого газа;
- температуры подогретого сырьевого газа на выходе из Т5;
- давления в Р2.

C. Предриформинг

Блок предриформинга характеризуется химическим превращением тяжелых углеводородов сырья в метан. Его работа направлена на частичную разгрузку блока риформинга с целью увеличения эффективности процесса.

Обессеренный сырьевой газ из Р2 с температурой не более 380 °C направляется в подогреватель сырьевого газа П10. На входе из П10 сырьевой газ смешивается с перегретым водяным паром в режиме регулируемого соотношения расходов (для поддержания неизменного молярного соотношения пар-углерод – 2,5:1). Система регулирования соотношения пар-углерод с перекрестным ограничением автоматически поддерживает подачу сырья для различных возможных сценариев и избыток пара над требуемым соотношением пар-углерод при изменениях режима работы печи риформинга П1.

Действие по регулированию с перекрестным ограничением – это метод, обеспечивающий регулирование соотношения расходов двух потоков, причем при изменении режима работы осуществляется поддержание излишка одного потока во время переходного процесса. Таким образом, для регулятора соотношения пара к углероду, если потребность в водороде возрастает, то в начале увеличивается количество пара, а затем – углеводородного сырья. А если потребность в водороде уменьшается, то в начале уменьшается количество углеводородного сырья, а затем – пара.

В реакторе предриформинга Р3 тяжелые углеводороды конвертируются в метан и выполняется часть работы риформинга. В Р3 проявляется суммарный экзотермический эффект реакции, и температура вдоль него поднимается.

Кроме вышеуказанной системы регулирования в блоке предриформинга осуществляется регулирование:

- расхода отдувочного газа;
- расхода сырьевой фракции гексана на входе в Р3;
- расхода сырьевой фракции пропан-бутана на входе в Р3;
- расхода сырьевого топливного газа на входе в Р3;
- расхода пара, добавляемого до и после предриформинга.

D. Риформинг

Блок риформинга предназначен для превращения сырья в синтез-газ.

Выходящий газ предриформинга смешивается с потоком перегретого водяного пара, подаваемого из охладителя О8 и подается в подогреватели сырьевого газа П11, расположенные в зоне конвекции печи риформинга П1.

Из П11 сырьевая смесь с температурой 630 °C поступает в радиантную секцию печи П1.

В радиантной секции П1 смесь сырья и водяного пара поступает в трубы, заполненные катализатором, где происходит реакция с образованием равновесной смеси водорода,monoоксида углерода, углекислого газа, метана и воды. Перегретый пар подается в сырье с избытком к стехиометрическому количеству, что предотвращает отложение углерода на катализаторе.

Синтез-газ покидает печь риформинга с температурой 890 °C и поступает в котел-утилизатор КУ1. Здесь охлаждение синтез-газа осуществляется за счет циркуляции котловой воды.

Подача синтез-газа выполнена в трубное пространство котла-утилизатора, а котловой воды – в межтрубное

пространство. Образующаяся при охлаждении синтез-газа пароводяная смесь поступает в паросборник П3 для сепарации насыщенного пара.

Синтез-газ в КУ1 охлаждается до температуры 282 °C и подается в холодильник реактора конверсии Х2, а пароводяная смесь из котла с температурой 247 °C направляется в паросборник П3.

В этом блоке осуществляется регулирование:

- расходов подаваемых потоков;
- расхода подаваемого пара в режиме регулируемого соотношения пар-углерод на уровне 2,7:1;
- температуры сырьевого газа на входе в радиационную секцию П1;
- температуры синтез-газа на выходе из печи изменением подачи ТГ.

E. Конверсия монооксида углерода и охлаждение синтез-газа

Блок конверсии монооксида углерода и охлаждения синтез-газа предназначен для превращения большей части монооксида углерода, содержащегося в синтез-газе в углекислый газ и водород избыточным количеством водяного пара в изотермическом конвертере Р4.

Синтез-газ из холодильника Х2 с температурой 235 °C поступает в конвертор Р4. Следует отметить, что здесь температура по зонам конвертора регистрируется в 12 точках.

Неочищенный водород из Р4 с температурой 250 °C поступает в нагреватель технологического конденсата Т6. Здесь происходит взаимодействие через стенку между неочищенным водородом с технологическим конденсатором. В результате теплообмена неочищенный водород охлаждается, а технологический конденсат подогревается.

Из Т6 неочищенный водород с температурой 157 °C направляется в теплообменник химочищенной декремнизованной воды Т12, после которого с температурой 135 °C подается в воздушный холодильник BX1. Далее охлажденный до температуры 66 °C неочищенный водород подается в холодильник X7, где охлаждается обратной водой до 45 °C.

Температура неочищенного водорода на выходе из BX1 регулируется автоматически частотой вращения вентилятора.

Из Т7 поток неочищенного водорода поступает в сепаратор технологического конденсата С7, где происходит отделение технологического конденсата от газовой фазы.

Неочищенный водород с содержанием не менее 75 % об. с верха С7 поступает во входной сепаратор С22 установки КЦА-1.

Здесь предусмотрено регулирование:

- температуры питательной воды в байпасной линии холодильника Х2;
- температуры средней точки в Р4 и неочищенного водорода на выходе из Р4;
- расхода питательной воды в Т4;

- расхода питательной воды в деаэратор;
- температуры химически очищенной декремнизованной воды на входе в деаэратор;
- уровня технологического конденсата в С7.

F. Очистка водорода

Блок очистки водорода предназначен для удаления из него примесей с помощью процесса КЦА.

Неочищенный водород поступает во входной сепаратор С22 КЦА-1, где происходит отделение газообразной фазы от унесенных капель технологического конденсата. Затем он поступает в блок КЦА-1, который состоит из 12 адсорбера, заполненных адсорбентом. Здесь с помощью процесса циклической адсорбции происходит удаление примесей. Для данной операции в КЦА-1 задействованы многочисленные слои. Применение данной технологии позволяет получить целевой продукт с чистотой водорода 99,9 % об.

На стадии адсорбции поток газа проходит через адсорбера в восходящем направлении, при этом примеси (вода, тяжелые углеводороды, летучие углеводороды,monoоксид углерода и азот) адсорбируются, а водород высокой чистоты с верха адсорбера поступает в продуктопровод.

Чистый водород от КЦА-1 смешивается с чистым водородом от КЦА-2 и поступает в приемный сепаратор С12, а затем на всас компрессора К2.

Остаточный газ, содержащий главным образом метан, углекислый газ и не восстановленный в КЦА-1 водород, подается к горелкам печи парового риформинга П1 в качестве основного топлива.

В этом блоке регулируемыми переменными являются:

- давление во входном и выходном трубопроводах С22;
- уровень технологического конденсата в С22 и С12;
- давление чистого водорода на выходе с КЦА-1;
- давление остаточного газа;
- расход остаточного газа;
- давление водорода на линии входа в С12.

III. НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА КАК ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ

A. Аппарат воздушного охлаждения BX1

Одним из элементов данного процесса является аппарат воздушного охлаждения (АВО) водорода BX1. Проведем его анализ как объекта управления.

Очевидно, что здесь регулирующим воздействием является частота вращения электропривода вентилятора n . Она определяет изменение расхода воздуха $Q_{\text{ср}}$.

Основные возмущающие воздействиями на АВО – температура атмосферного воздуха $\theta_{\text{ср}}$ и расход водорода $Q_{\text{в}}$. Так же может меняться температура водорода на входе АВО при изменении режима работы блока риформинга.

На рис. 2 представлена структурная схема АВО как объекта управления.

Анализ процесса КЦА как объекта управления показал переменные, которые оказывают значительное влияние на его течение [9].

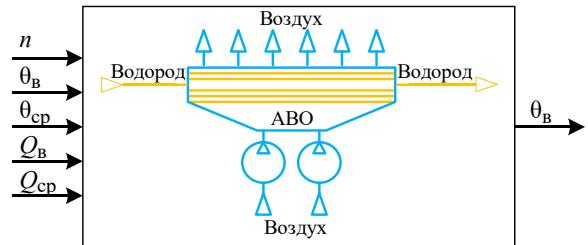


Рис. 2. АВО как объект управления

B. Короткоцикловая безнагревная адсорбция

Входными переменными являются:

- время полуцикла $t_{\text{пп}}$;
- флегмовое число F ;
- давление исходной смеси $p_{\text{ис}}$;
- температура исходной смеси $\theta_{\text{ис}}$;
- концентрации компонентов исходной смеси $C_{\text{ис}}$;
- степень открытия клапана на выходе водорода $h_{\text{кл}}$;
- давление водорода в выходном трубопроводе $p_{\text{в}}$;
- давление остаточного газа в выходном трубопроводе $p_{\text{ог}}$.

Выходные переменные представлены:

- составы водорода и остаточного газа на выходах установки $C_{\text{в}}, C_{\text{ог}}$;
- расходы водорода $Q_{\text{в}}$, остаточного газа $Q_{\text{ог}}$, продувочного газа $Q_{\text{п}}$, исходной смеси $Q_{\text{ис}}$;
- динамика давление в адсорберах $p_i(t)$, где $i = 1 \dots n$ (n – количество адсорбиров).

На рис. 3 представлена схема КЦА как объекта управления.

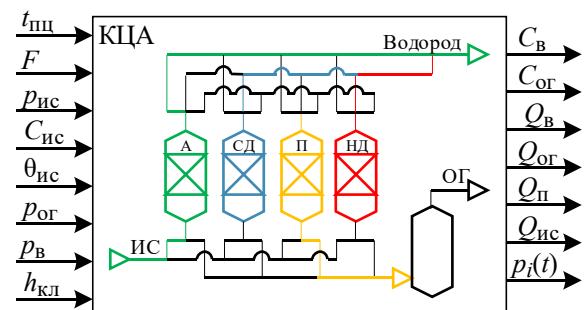


Рис. 3. КЦА как объект управления

На схеме приняты следующие обозначения: ИС – исходная смесь; А – процесс адсорбции; СД – снижение давления; П – продувка; НД – набор давления; ОГ – остаточный газ.

В качестве управляющих переменных используются: время полуцикла $t_{\text{пп}}$, флегмовое число F , давление исходной смеси $p_{\text{ис}}$, степень открытия клапана $h_{\text{кл}}$, температуру исходной смеси $\theta_{\text{ис}}$, давление водорода $p_{\text{в}}$, давление остаточного газа $p_{\text{ог}}$.

IV. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

A. Проблемы разработки математической модели КЦА

Как видно из выше изложенного непосредственное влияние на качество водорода оказывают изменение давления, температуры и других переменных. Если проводить исследование ТП с применением физических моделей, то это приведет к значительным финансовым, временным и трудовыми затратам [9]. Это делает актуальным направление разработки математических моделей (ММ) ТП установки производства водорода. Получение адекватных ММ с учетом управляющих и возмущающих воздействий позволит повысить эффективность установки, а также сократить время на проектирование и пусконаладочные работы.

Отметим, что в настоящее время имеется много работ, посвященных разработке математических моделей процессов КЦА [9]. Основными недостатками полученных ММ являются:

- Математические описания сорбционных процессов приводятся для отдельных слоев. При этом не учтено взаимодействие адсорбиров между собой.
- Не учитывается многокомпонентность газовых смесей.
- Осуществляется моделирование установок с двумя цилиндрическими адсорбераами с однотипной загрузкой адсорбента.
- Не учитывается изменение параметров внешней среды.

Исходя из вышеизложенного при разработке ММ КЦА необходимо учитывать [9]:

- многокорпусную компоновку установки;
- многокомпонентную исходную смесь;
- сложную внутреннюю геометрию адсорбиров;
- нестационарные нагрузки по давлениям исходной смеси, водорода, остаточного газа, составу исходной смеси и т.д.

В [9] разработаны взаимосопряженные ММ сорбционных, тепловых и гидромеханических процессов, протекающих в КЦА дополненная математическим описанием внешних возмущений.

B. Математическая модель теплообменных процессов в АВО

В [10] представлена ММ теплообменных процессов в АВО для осуществления процессов конденсации и охлаждения флегмы. Применим данную ММ для описания процесса охлаждения в АВО неочищенного водорода [10, 11]:

$$\frac{d\theta_{\text{в}}(x,t)}{dt} = -v_{\text{в}} \frac{\partial \theta_{\text{в}}(x,t)}{\partial x} - R_{\text{в}} [\theta_{\text{в}}(x,t) - \theta_{\text{ст}}(x,t)];$$

$$\frac{d\theta_{\text{ст}}}{dt} = R_{\text{в,ст}} (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{ст}}) - N R_{\text{ст,ср}} (\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{ср}}),$$

где $\theta_{\text{в}}$, $\theta_{\text{ст}}$, $\theta_{\text{ср}}$ – температура водорода, стенки труб и среды (атмосферного воздуха); $v_{\text{в}}$ – скорость водорода; N – количество труб; $R_{\text{в}}$, $R_{\text{в,ст}}$, $R_{\text{ст,ср}}$ – коэффициенты, учитывающие физико-технологические характеристики водорода и стенки.

Границные условия для ММ:

$$\theta_{\text{в}}^{\text{вх}}(t) = \theta_{\text{в}}(x)|_{x=0}; \quad \theta_{\text{в}}^{\text{вых}}(t) = \theta_{\text{в}}(x)|_{x=l},$$

где l – длина труб с оребрением.

Начальные распределения температур вдоль теплообменной секции для ММ:

$$\theta_{\text{ст}}(x)|_{t=0} = \theta_{\text{ст}}^{\text{вх}}(x); \quad \theta_{\text{в}}(x)|_{t=0} = \theta_{\text{в}}^{\text{вх}}(x).$$

Для проведения компьютерного эксперимента осуществлен переход к дискретно-непрерывному виду ММ по методике, изложенной в [11]. Проведено исследование поведения ТП охлаждения при следующих возмущающих воздействиях:

- изменение расхода водорода;
- изменение температуры водорода на входе;
- изменение температуры атмосферного воздуха.

Анализ полученных результатов показал, что для достижения заданных температур водорода необходимо осуществлять управление теплообменными процессами в АВО.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования проведен анализ этапов технологического процесса получения водорода как объектов управления, в частности процессов охлаждения водорода в АВО и короткоцикловой безнагревной адсорбции. Определены проблемы разработки математической модели процесса короткоцикловой безнагревной адсорбции. Разработана математическая модель теплообменных процессов охлаждения водорода в АВО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черный И.Р. Производство сырья для нефтехимических синтезов. – М.: Химия, 1983. – 336 с.
2. Иоффе В.Б. Основы производства водорода. – Л.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1960. – 430 с.
3. Паркаш С. Справочник по переработке нефти. – М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2012. – 776 с.
4. Письмен М.К. Производство водорода в нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Химия, 1976. – 208 с.
5. Степанов А.В. Получение водорода и водородсодержащих газов. Киев: Наук.думка, 1982. – 312 с.
6. Матковский П.Е., Седов И.В., Савченко В.И., Яруллин Р.С. Технологии получения и переработки синтез-газа // Газохимия. – 2011. – № 3-4 (19-20). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-polucheniya-i-pererabotki-sintez-gaza> (дата обращения: 28.06.2021).
7. Миргазов И.И., Абдуллин А.И. Современные методы получения синтез-газа и процесс Фишера-Тропша // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoye-metody-polucheniya-sintez-gaza-i-protsess-fishera-tropsha> (дата обращения: 28.06.2021).
8. Солодова Н.Л., Минигулов Р.Р., Емельяновичева Е.А. Водород как перспективный энергоноситель. Современные методы получения водорода // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vodorod-kak-perspektivnye-energositol-sovremennoye-metody-polucheniya-vodoroda> (дата обращения: 28.06.2021).
9. Матвеин В.Г., Погонин В.А., Путин С.Б., Скворцов С.А. Математическое моделирование и управление процессом коротко-цикловой безнагревной адсорбции. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 140 с.
10. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов адсорбционной осушки природного газа. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 160 с.
11. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Исследование управляемых процессов охлаждения и конденсации при подготовке газа к транспортировке // XXIV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2021): Сборник докладов. Санкт-Петербург. 26–28 мая 2021 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – С. 90-93.

Прикладные аспекты минимаксной оптимизации в обратных задачах технологической теплофизики

Дилигенская Анна Николаевна

Институт автоматики и информационных технологий
ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический
университет"
Самара, Россия
adiligenskaya@mail.ru

Самокиши Александр Валерьевич

Институт автоматики и информационных технологий
ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический
университет"
Самара, Россия
gfkh31@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты исследований, посвященных вопросам применения методологии последовательной параметрической оптимизации при решении прикладных обратных задач технологической теплофизики. Продемонстрирована возможность распространения метода минимаксной оптимизации на решение обратной задачи, предусматривающей определение двух неизвестных характеристик процесса теплопроводности по одной экспериментальной зависимости. В условиях действия возмущений подход, реализующий параметризацию решений на компактных множествах, дополнен применением искусственной нейронной сети.

Annotation. Application aspects of the methodology of sequential parametric optimization in solving applied inverse problems of technological thermophysics are investigated. The minimax optimization method is extended to the solution of the inverse problem, which provides for the determination of two unknown characteristics of the heat conduction process from one experimental dependence. Under the conditions of the action of disturbances, the method of sequential parameterization of solutions on compact sets is supplemented by the use of an artificial neural network.

Ключевые слова: обратная задача теплопроводности, параметрическая оптимизация, минимаксная оптимизация, одновременная идентификация, возмущающие воздействия.

Keywords: inverse problem of heat conduction, parametric optimization, minimax optimization, simultaneous identification, disturbing influences.

I. ВВЕДЕНИЕ

Обратные задачи математической физики, представленные дифференциальными уравнениями в частных производных параболического типа, относятся к широкому классу обратных задач теплопроводности (ОЗТ) и составляют основу исследования нестационарных процессов технологической теплофизики. В результате решения ОЗТ могут быть определены характеристики и параметры внешних или внутренних воздействий процесса, а также теплофизические свойства объекта по полученным в результате экспериментальных исследований измерениям температурного состояния в ограниченной пространственной области. Актуальные вопросы технологической теплофизики: исследование условий теплообмена на внешней или внутренней (например, в трубопроводах) поверхности тела, анализ теплообмен-

ных режимов при испытаниях сложных технических систем, определение теплофизических свойств материалов, проектирование тепловых установок, обеспечивающих необходимый тепловой режим, – в настоящее время базируются на результатах решения обратных задач теплопроводности.

Такие задачи относятся к задачам интерпретации результатов экспериментов и принадлежат к классу некорректных задач, в которых не выполняются классические условия корректности [1–3]. Решение обратных задач математической физики и, в том числе, обратных задач теплопроводности, производится с применением теории регуляризации – теории решения некорректно поставленных задач, – основу которой составляют численные регуляризирующие алгоритмы (регуляризация по Тихонову и с применением принципа саморегуляризации) или условно-регулярные методы, позволяющие находить решения на множествах корректности – компактных множествах [1–5]. На сегодняшний день в теории регуляризации существует большое разнообразие методов и подходов, основанных на классических результатах или использующих современные технологии решения. Многообразие методов обусловлено широким распространением обратных задач в прикладных исследованиях реальных технологических процессов, их актуальностью, разнообразием их типов, постановок и областей применимости.

В случае аналитического исследования процессов нестационарной теплопроводности определенными преимуществами обладает конструктивный алгоритмически точный метод последовательной параметрической оптимизации [6–9], осуществляющий поиск физически реализуемых решений на компактных множествах их определения без применения численных регуляризирующих алгоритмов, и распространяемый на основные виды обратных задач теплопроводности.

Эффективность решения обратных задач теплопроводности во многом зависит от качественного и количественного представления входной информации, полученной в результате проведения экспериментальных исследований. Как правило, экспериментальная информация подвержена действию возмущающих факторов, что существенно влияет не только на точность решения задачи, но и на его устойчивость, что необходимо при-

нимать во внимание при выборе метода решения. Другим актуальным вопросом практических теплофизических исследований является полнота и достоверность математического описания процесса. Зачастую в результате решения ОЗТ необходимо идентифицировать несколько характеристик, составляющих математическую модель исследуемого теплообменного процесса.

Статья демонстрирует применение метода минимаксной оптимизации при решении ОЗТ в одномерной области в распространенных на практике ситуациях, предусматривающих определение нескольких (в частном случае, двух) характеристик процесса по одной экспериментальной реализации, полученной на интервале идентификации в одной пространственной точке, а также решение задачи в случае действия погрешностей измерений.

II. Минимаксная оптимизация в обратных задачах теплопроводности

Основные положения метода последовательной параметризации решений обратных задач теплопроводности на компактных множествах физически обоснованных функций изложены в работах [6–9] и некоторых других. Суть метода состоит в редукции исходной некорректно поставленной ОЗТ к условно-корректной задаче параметрической оптимизации температурных невязок при использовании равномерной метрики оценивания (на основе минимаксного функционала оптимизации). Условно-корректные задачи формулируются на компактных множествах функций, заданных с учетом их физической реализуемости на основе их гладкости, в качестве которых наиболее удобно использовать кусочно-параболические или полиномиальные функции. Предварительная параметризация искомой сосредоточенной $u(\varphi)$ или пространственно распределенной $u(x)$ величины на заданном множестве решений приводит к её параметрическому представлению, задаваемому с помощью количества N аппроксимирующих параметров и их значений ($\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$). Использование параметрической формы $u(\varphi, \Delta) = u(\varphi, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N)$ или $u(x, \Delta) = u(x, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N)$ идентифицируемой характеристики, рассматриваемой в качестве входной величины процесса теплопроводности, приводит к параметризованному представлению $T_M(x, \varphi, \Delta)$ выходного воздействия – температурного состояния $T(x, \varphi)$.

На основе невязки $T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta)$ между экспериментальной температурной зависимостью $T^*(\varphi) = T(x^*, \varphi)$, полученной в точке термометрирования x^* на интервале идентификации $\varphi \in [0, \varphi^*]$, и её модельным параметрическим представлением $T_M(x^*, \varphi, \Delta)$ записывается задача математического программирования относительно искомого вектора параметров $\Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N)$ с применением минимаксного функционала оптимизации [10]. Тем самым, исходная некорректно поставленная ОЗТ сведена к задаче параметрической оптимизации (ЗПО), которая реализует оценивание разности модельной и экспериментальной температур на заданном интервале идентификации в равномерной (чебышевской) метрике.

Решение полученной задачи математического программирования с негладкой функцией максимума производится с помощью метода, основанного на анализе поведения оптимальных решений, согласно которому для температурной невязки в отдельных точках на интервале

идентификации выполняются альтернансные соотношения (знакочередование максимальных по модулю значений). Основное свойство, связывающее количество точек альтернанса с числом искомых параметров используется для формирования замкнутой системы уравнений, составленной относительно всех неизвестных задачи – величины максимального отклонения температурной невязки и значений параметров.

Найденные значения параметров используются для кусочно-параболической или полиномиальной аппроксимации идентифицируемой характеристики процесса теплопроводности, и с ростом степени аппроксимирующей зависимости (и числа учитываемых параметров) образуют последовательность решений, сходящихся к точной величине искомой функции.

III. Одновременная идентификация нескольких функций

A. Итерационная минимаксная оптимизация

На практике нередко встречаются ситуации, не сводящиеся к базовому варианту идентификации одной функции при наличии полной информации об остальных характеристиках и параметрах процесса. В ряде прикладных исследований решение ОЗТ предусматривает определение нескольких неизвестных функций по изменениям одной величины. Такая задача приводит к увеличению объема необходимых вычислений и является значительно более сложной, чем задача нахождения единственной характеристики.

Решение задачи идентификации нескольких (двух и более) входных величин процесса нестационарной теплопроводности на основе информации о поведении одной характеристики – температуры, полученной на интервале идентификации в одной пространственной точке, также может быть реализовано с помощью метода минимаксной оптимизации. Далее приведены основные результаты, демонстрирующие особенности применения методологии параметрической оптимизации для решения одномерной ОЗТ по восстановлению двух неизвестных функций, одна из которых является сосредоточенной, а вторая – пространственно распределенной величиной: плотности граничного теплового потока $q(\varphi)$ и начального температурного распределения $T_0(x)$, – на основе результатов измерения температуры в точке x^* .

Математическая модель процесса нестационарной теплопроводности, лежащая в основе решения ОЗТ, описывает поведение систем с распределенными параметрами и имеет следующий вид

$$\frac{\partial T(x, \varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 T(x, \varphi)}{\partial x^2}, x \in (0, 1), \varphi \in (0, \varphi^*], \quad (1a)$$

$$T(x, 0) = T_0(x); \frac{\partial T(0, \varphi)}{\partial x} = 0; \frac{\partial T(1, \varphi)}{\partial x} = q(\varphi). \quad (1b)$$

В предложенной постановке обратной задачи полагается, что функции $q(\varphi)$ и $T_0(x)$ являются неизвестными, которые должны быть определены на основе экспериментальной информации $T^*(\varphi)$, полученной в точке x^* на временном интервале $\varphi \in [0, \varphi^*]$.

Пусть, согласно [7], идентификация каждой из неизвестных характеристик производится в классе гладких функций с априори заданными степенями аппроксимирующих зависимостей. Тогда векторы $\Delta^{(q)}$ и $\Delta^{(0)}$ искомых параметров для каждой из аппроксимирующих характеристик $q(\varphi, \Delta^{(q)})$ и $T_0(x, \Delta^{(0)})$ содержат соответствующие коэффициенты параметрического представления идентифицируемых функций, а также некоторые дополнительные величины $\gamma^{(q)}$ и $\gamma^{(0)}$, число которых зависит от выбранного компактного множества решений. В общем случае соответствующая задача математического программирования с минимаксным критерием записывается в следующем виде:

$$I(\Delta) = |T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta^{(q)}, \Delta^{(0)})| \quad (2a)$$

$$I(\Delta) \rightarrow \min_{\Delta^{(q)}, \Delta^{(0)}}. \quad (2b)$$

В задаче (2) размерность N результирующего вектора искомых параметров $\Delta = (\Delta^{(q)}, \Delta^{(0)})$ является увеличенной по отношению к базовому случаю идентификации одной характеристики, при описании искомых величин функциями того же класса. Это вызывает дополнительные трудности вычислительного характера при поиске оптимальных значений вектора Δ , а также оказывает влияние на точность решения задачи.

Согласно [7, 10], замкнутая относительно искомых параметров Δ , система расчетных соотношений составляется на основе альтернансы свойств оптимальных решений для предельных значений температурных невязок в точках альтернанса и дополнительно содержит два значения их предельных отклонений (значения альтернансов) для $q(\varphi)$ и $T_0(x)$ соответственно.

Таким образом, непосредственное решение системы уравнений с $N^{(q)} + N^{(0)} + 2$ искомыми величинами и вспомогательными неизвестными координатами точек альтернанса является достаточно трудоемкой процедурой, требующей априорной информации о начальных приближениях всех неизвестных величин. Поэтому для решения поставленной ОЗТ был использован итерационный подход, реализующий поочередное нахождение векторов $\Delta^{(q)}$ и $\Delta^{(0)}$, при котором на каждом шаге вычислений параметров одной из характеристик, вторая функция считается известной из результатов расчета предыдущего этапа. При таком подходе число искомых параметров на каждом шаге соответствует количеству неизвестных в обратной задаче теплопроводности по определению единственной характеристики, и равно $N^{(q)} + 1$ при определении $q(\varphi)$ или $N^{(0)} + 1$ при поиске начального состояния $T_0(x)$.

Для реализации указанного подхода производится декомпозиция задачи (2) к двум отдельным задачам параметрической оптимизации, в каждой из которых отыскивается один из векторов $\Delta^{(q)}$ или $\Delta^{(0)}$, аппроксимирующих одну из искомых функций. В задаче отыскания плотности теплового потока $q(\varphi)$ функция $T_0(x)$ полагается известной на основе дополнительной информации. Например, на начальной итерации температурное распределение в нулевой момент времени может быть принято нулевым, а на последующих этапах в качестве $T_0(x)$ используется аппроксимация $f_0(\Delta^{(0)})$ в искомом классе

функций с помощью значений вектора параметров $\Delta^{(0)}$, рассчитанных на предыдущем шаге. Соответствующая ЗПО, обеспечивающая нахождение вектора $\Delta^{(q)}$, принимает вид

$$I_q(\Delta^{(q)}) = |T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta^{(q)}, f_0(\Delta^{(0)}))| \quad (3a)$$

$$I_q(\Delta^{(q)}) \rightarrow \min_{\Delta^{(q)}}. \quad (3b)$$

Аналогичным образом записывается задача, реализующая восстановление начального состояния $T_0(x)$ относительно вектора параметров $\Delta^{(0)}$, где значение плотности теплового потока рассчитывается на основе кусочно-параболической или полиномиальной аппроксимации $f_q(\Delta^{(q)})$ с помощью найденных на предыдущем этапе значений вектора $\Delta^{(q)}$:

$$I_0(\Delta^{(0)}) = |T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, f_q(\Delta^{(q)}), \Delta^{(0)})| \quad (4a)$$

$$I_0(\Delta^{(0)}) \rightarrow \min_{\Delta^{(0)}}. \quad (4b)$$

При этом в задаче (3) определения граничного теплового потока и в задаче (4) поиска начального распределения температуры оптимизация соответствующих температурных невязок $T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta^{(q)}, f_0(\Delta^{(0)}))$ или $T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, f_q(\Delta^{(q)}), \Delta^{(0)})$ производится на основе одной и той же экспериментальной температурной зависимости $T^*(\varphi)$.

Итерационная процедура, состоящая в поэтапном решении задач (3) и (4), реализует последовательное нахождение параметрических векторов $\Delta^{(q)}$ и $\Delta^{(0)}$, обеспечивающих сходжение $T_M(x^*, \varphi, \Delta)$ к заданной кривой $T^*(\varphi)$. Вычисления продолжаются до тех пор, пока на каком-либо очередном расчетном шаге решения задачи не будут достигнуты заданные показатели сходимости итерационного процесса:

$$\begin{aligned} &|T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta_j)| - \\ &|T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta_{j-1})| \leq \beta . \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, в результате решения ОЗТ с помощью итерационной процедуры минимаксной оптимизации температурных невязок на компактных множествах специальной формы осуществляется одновременная кусочно-параболическая или полиномиальная аппроксимация двух неизвестных характеристик – плотности граничного теплового потока и начального температурного распределения. Подобно задачам определения единственной характеристики, в рассмотренной постановке (2) с ростом числа параметров N обеспечивается сходимость искомых решений к точным значениям идентифицируемых величин.

B. Результаты итерационной вычислительной процедуры

Некоторые результаты применения изложенного подхода для решения ОЗТ по одновременному определению неизвестных характеристик $q(\varphi)$ и $T_0(x)$ на компактном множестве кусочно-параболических функций при $N^{(q)} = N^{(0)} = 2$ представлены на рис. 1–3.

Точное значение идентифицируемого граничного теплового потока $q^*(\varphi)$ рассчитывалось с помощью экспоненциальной зависимости

$$q^*(\varphi) = k(1 - e^{-\alpha\varphi}),$$

а начальное пространственное температурное распределение представляло сумму экспоненциальной и синусоидальной функций

$$T^*(x) = k_1(1 - e^{-\sigma x}) + k_2 \sin(\omega \pi x).$$

Завершение вычислительного процесса осуществлялось при достижении заданного показателя точности $\beta=2\%$, согласно условию (5). На практике итерационная процедура достаточно быстро сходилась к значениям параметров $\Delta = (\Delta^{(q)}, \Delta^{(0)})$, образующим устойчивую конфигурацию температурной невязки (рис. 1). На заключительных итерациях разница между отклонениями температур $T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta^{(q)}, f_0(\Delta^{(0)}))$ и $T^*(\varphi) - TMx^*, \varphi, f_q \Delta q, \Delta(0)$, найденными из решения задач (3) и (4) соответственно, составила менее 1%, что представлено на рис. 1

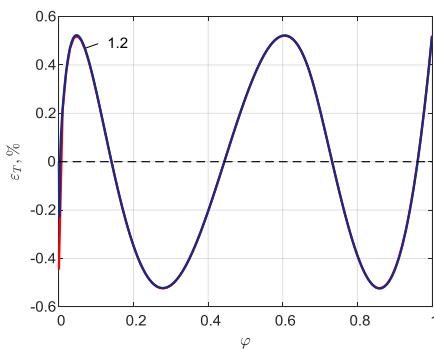


Рис. 1. Результатирующая конфигурация температурной невязки: 1 – $T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta^{(q)}, f_0(\Delta^{(0)}))$, 2 – $T^*(\varphi) - TMx^*, \varphi, f_q \Delta q, \Delta(0)$

Для проверки адекватности и эффективности итерационной процедуры минимаксной оптимизации по восстановлению одновременно двух характеристик математической модели процесса теплопроводности было проведено сравнение полученных результатов с результатами решения ОЗТ по идентификации каждой из искомых функций $q(\varphi)$ и $T_0(x)$ при наличии полной информации о другой характеристике.

Полученные данные показывают незначительное отличие результатов одновременной идентификации двух неизвестных функций от результатов решения типовых ОЗТ по восстановлению единственной величины. Так, при принятых входных данных результаты решения задачи восстановления $q(\varphi)$ при известных остальных характеристиках математической модели практически не отличаются от результатов, полученных в задаче одновременной идентификации двух характеристик. На рис. 2 показаны конфигурации ошибок идентификации $q(\varphi)$ для двух случаев, разница между которыми составляет доли процента.

В задаче определения начального температурного состояния разница между кривыми погрешности восстановления $T_0(x)$ при известных остальных данных и в задаче одновременного определения $q(\varphi)$ и $T_0(x)$ является более существенной, но при этом не превышает 2 % от значения идентифицируемой величины, что также подтверждает эффективность предложенного подхода. Та-

кая ситуация показана на рис. 3 и объясняется особенностями конкретной задачи: здесь граничное воздействие оказывает большее влияние на результирующее температурное состояние, чем начальные условия, что косвенно сказывается на идентификации $T_0(x)$.

Эти изменения незначительно влияют на конфигурацию температурной невязки, и форма кривых $T^*(\varphi) - TMx^*, \varphi, \Delta$, найденных из решения задач (3) и (4) при одновременном определении двух величин, и в результате решения задач идентификации единственной характеристики при наличии информации о второй функции, практически не меняется и совпадает с конфигурацией, приведенной на рис. 1.

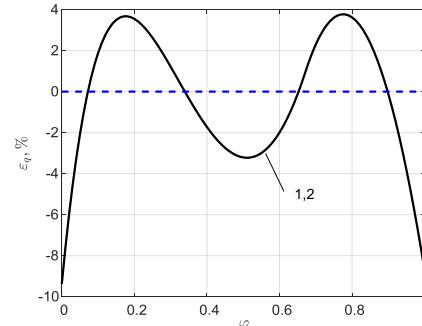


Рис. 2. Ошибка $q^*(\varphi) - q(\varphi, \Delta^{(q)})$ идентификации плотности теплового потока: 1 – при известной $T_0(x)$, 2 – одновременная идентификация $q(\varphi)$ и $T_0(x)$

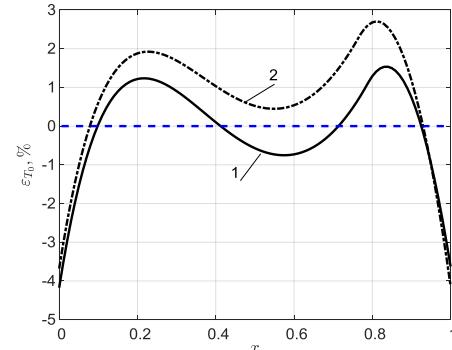


Рис. 3. Погрешность $T_0^*(x) - T_0(x, \Delta^{(0)})$ определения начального состояния: 1 – при известной $q(\varphi)$, 2 – одновременная идентификация $T_0^*(x)$ и $q(\varphi)$

IV. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ

Другим не менее важным аспектом, который необходимо принимать во внимание при решении реальных обратных задач технологической теплофизики, является влияние возмущающих факторов на входную информацию, полученную экспериментальным путем. Вероятностный характер реальных данных эксперимента, обусловленный действием помех измерительной аппаратуры, искажает наблюдаемый сигнал и вызывает сложности при использовании методов решения ОЗТ.

Конструктивная реализация метода минимаксной оптимизации предусматривает формирование замкнутой относительно искомых параметров Δ расчетной системы соотношений для предельно допустимых значений темпе-

ратурной невязки, которая дополняется условиями существования экстремумов разности $T^*(\varphi) - T_M(x^*, \varphi, \Delta)$. В такой ситуации непосредственное применение метода параметрической оптимизации вызывает серьезные затруднения, и базовый вариант данного метода приходится дополнить алгоритмами, использующими статистическую обработку [11], управление семейством допустимых реализаций [12], или методами искусственного интеллекта [13].

Дополнительные возможности для решения ОЗТ в случае действия помех измерений представляет сочетание метода параметрической оптимизации с искусственными нейросетевыми технологиями [14, 15], при котором структура искомого решения задается в соответствии с общим подходом к последовательной параметризации решений на компактных множествах специальной формы, а значения соответствующего вектора параметров находятся в результате решения ЗПО с использованием нейронных сетей.

На выбранном компактном множестве решений, характеризуемом числом N искомых параметров $\Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N)$, на основе информации об их предельных значениях (в условиях ограниченной неопределенности)

$$\Delta_i^{\inf} \leq \Delta_i \leq \Delta_i^{\sup}, i = \overline{1, N}$$

формируется набор данных, содержащих выборочные значения каждого из параметров в допустимом диапазоне их изменения. Заполненная подобным образом матрица значений параметров выступает в качестве целевого множества для нейронной сети.

Результаты решения прямой задачи нестационарной теплопроводности на основе точной математической модели процесса (1) для совокупности допустимых вариантов комбинаций параметров, аппроксимирующих идентифицируемую характеристику, используются в качестве входного множества при обучении искусственной нейронной сети (ИНС). Обучение сети обеспечивает минимизацию отклонения модельных данных от заданных для всех температурных реализаций из обучающего множества и может проводиться с применением стандартного для нейросетевых моделей квадратичного функционала или используемого в методе параметрической оптимизации минимаксного критерия.

Таким образом, обучающие данные для ИНС формируются на основе математического описания объекта с распределенными параметрами, учитывающего физические аспекты процесса теплообмена, а недостаток информации об идентифицируемой характеристике компенсируется совокупностью допустимых комбинаций её аппроксимирующих параметров, исходя из условий их ограниченной неопределенности.

Обученная нейронная сеть далее используется для решения задачи параметрической оптимизации на основе экспериментальных данных, содержащих погрешности измерений δ

$$I_{\text{ИНС}}(\Delta) =$$

$$= \sum_{\varphi \in [0, \varphi^*]} (T^*(\varphi, \delta) - T_{\text{ИНС}}(x^*, \varphi, \Delta))^2 \rightarrow \min_{\Delta}. \quad (6)$$

Случайный характер погрешностей измерения существенно искажает конфигурацию температурной невязки $T^*(\varphi, \delta) - T_{\text{ИНС}}(x^*, \varphi, \Delta)$, что обуславливает применение квадратичного функционала (6), который позволяет избежать использования процедур сглаживания данных или иной статистической обработки информации, что может привести к потере существенных свойств исследуемого процесса.

Выходом нейросетевой модели будет N -мерный вектор параметров $\Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N)$, обеспечивающий аппроксимацию искомой характеристики в условиях действия возмущающих факторов.

Предложенный подход также может быть применен для последовательной параметризации решений на компактных множествах кусочно-параболических или полиномиальных функций при увеличении числа N учтываемых параметров Δ .

Схема алгоритма решения граничной ОЗТ на компактном множестве полиномиальных функций с применением нейросетевых технологий в условиях возмущенных входных данных приведена на рис. 4. Здесь использована архитектура сети на основе радиальных базисных функций (РБФ-сеть) [16].

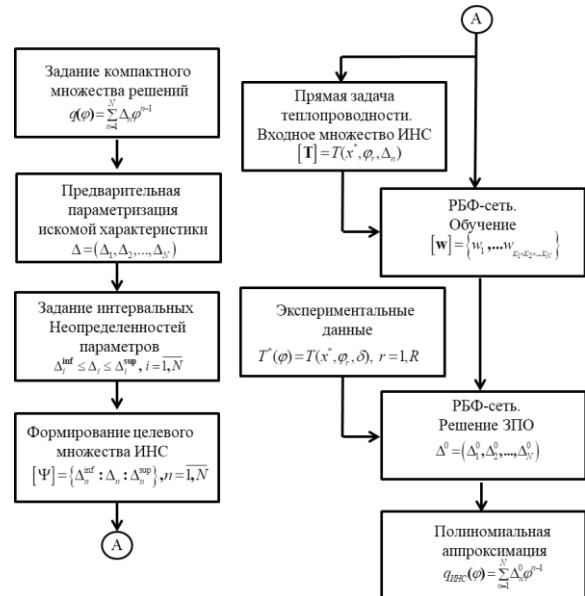


Рис. 4. Схема алгоритма параметрической оптимизации с применением ИНС

Изложенный подход к решению ОЗТ в условиях действия возмущающих факторов учитывает качественные особенности теплообменных процессов на основе точной математической модели объекта с распределенными параметрами и использует широкие возможности искусственных нейронных сетей при обработке больших массивов данных. Данный метод подтвердил свою работоспособность и адекватность полученных результатов на достаточно широком диапазоне действия помех измерений $\delta = 0-15\%$ при достоверном задании доступной информации о значениях аппроксимирующих параметров в условиях их ограниченной неопределенности.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье продемонстрированы возможности метода последовательной параметрической оптимизации в обратных задачах теплопроводности на компактных множествах физически обоснованных функций при решении прикладных задач в сфере технологической теплофизики, при выполнении теплофизических исследований.

Рассмотрены две актуальные проблемы, зачастую встречающиеся при анализе реальных процессов нестационарной теплопроводности: задача одновременной идентификации нескольких (в данном случае, двух) характеристик технологического процесса по одной экспериментальной зависимости, и решение ОЗТ в условиях действия помех измерений.

Метод параметрической оптимизации может быть использован в качестве основы для решения прикладных задач, характеризующихся указанными условиями, и предоставляет большие возможности для дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
2. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
3. Бек Д., Блакузелл Б., Сент-Клер Ч. мл. Некорректные обратные задачи теплопроводности. – М.: Мир, 1989. – 311 с.
4. Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко Б.Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 264 с.
5. Алифанов О.М., Артиюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 288 с.
6. Дилигенская А.Н., Рапорт Э.Я. Аналитические методы параметрической оптимизации в обратных задачах теплопроводности с внутренним тепловыделением // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 5. – С. 1082-1089.
7. Diligenskaya A.N. Methods of Sequential Parametric Optimization in Inverse Problems of Technological Thermophysics // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). – Samara, Russia, 2019. – P. 267-270.
8. Diligenskaya A.N., Rapoport E.Y. Method of minimax optimization in the coefficient inverse heat-conduction problem // J. Eng. Phys. Thermophys. – 2016. – Vol. 89, No. 4. – P. 1008-1013.
9. Diligenskaya A.N. Solution of the retrospective inverse heat conduction problem with parametric optimization // High Temperature. – 2018. – Vol. 56, No. 3. – P. 382-388.
10. Rapoport Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
11. Дилигенская А.Н. Метод параметрической оптимизации в граничной обратной задаче теплопроводности с фильтрацией возмущений // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 17-24.
12. Дилигенская А.Н. Параметрическая оптимизация в обратных задачах теплопроводности в условиях интервальной неопределенности возмущений // Труды XX Междунар. Конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Офорт", 2018. – С. 112-118.
13. Дилигенская А.Н., Самокин А.В. Параметрическая идентификация в обратных задачах теплопроводности в условиях интервальной неопределенности на основе нейронных сетей // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2020. – Т. 28, № 4. – С. 6-18.
14. Krejsa J., Woodbury K.A., Ratliff J.D. and Raudensky M. Assessment of strategies and potential for neural networks in the inverse heat conduction problem // Inverse Problems in Engineering. – 1999. – Vol. 7, No. 3. – P. 197-213.
15. Deng S., Hwang Y. Applying neural networks to the solution of forward and inverse heat conduction problems // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – Vol. 49. – P. 4732-4750.
16. Gorbachenko V.I. and Zhukov M.V. Solving boundary value problems of mathematical physics using radial basis function networks // Comput. Math. and Math. Phys. – 2017. – Vol. 57, No. 1. – P. 145-155.

Реализация регулятора двух мерного распределённого объекта

Зайцев Сергей Владиленович
Пятигорский институт (филиал)
Северо-Кавказский федеральный университет
Пятигорск, Россия
zaytsev.kmv@gmail.com

Аннотация. В данной статье предложен метод реализации двух мерного регулятора с помощью ПЛК (программируемого логического контроллера) с использованием синтезированных коэффициентов на основе модальных воздействий. Для создания регулятора необходимо учитывать конструкционные характеристики объекта. В докладе показана методика создания регулятора для каждой зоны объекта. Регулятор реализован как пропорциональный пространственный. Регулятор может быть расширен до распределенного высокоточного регулятора за счет увеличения компонентов регулятора. Количество блоков управления в регуляторе определяется количеством элементов в передаточной матрице.

Annotation. In this article takes see method realization regulators for double measure distributed object. This regulators base on the PLC (programmable logical computer) with use synthesis coefficient's which base on fashion inset function. For realization regulators require defining the construction parameters object. In this article takes see regulators for different zone. Realization regulator is the distributed proportions regulator with use increase differential component. Quantity control block in the regulator determine quantity element on the transmission matrix.

Ключевые слова: реализации двух мерного регулятора регулятор, распределенный регулятор.

Keywords: realization regulators for double measure distributed object, distributed regulator.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основными регуляторами, которые использует современная промышленность являются пропорционально-интегро-дифференцирующие (ПИД) и релейные регуляторы, по некоторым оценкам их объём составляет 90-95%. ПИД регуляторы позволяют обеспечить наилучшие показатели качества регулирования и получит качественно протекающие технологические процессы при управлении техническими объектами. Регулятор обладает относительной простотой конструкции и высокой надежностью работы. За долгие годы эксплуатации закон ПИД управления расширился за счет нововведений; – методы автоматической настройки, – предварительная фильтрация, – модификация структуры. Сокращенный анализ различных систем ПИД-регуляторов приведен в литературе [1, 2]. Синтез и настройка всех этих регуляторов основывается на рассмотрении объекта как объекта с сосредоточенными параметрами, но в промышлен-

ности эксплуатируются системы с распределенными параметрами или многоканальные. Такие системы требуют новых методов синтеза и адаптивного управления.

II. МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ РЕГУЛЯТОРА

Возможным решением этих проблем является разработка методов адаптивной настройки распределенного регулятора. Исследования методов адаптации и проверка результата методов синтеза [3,4] проводились на лабораторном стенде [5].

В настоящей статье рассмотрим реализацию регулятора для двух мерного распределенного объекта. Пусть объект представляет собой плоскость, изображённую на рис. 1.

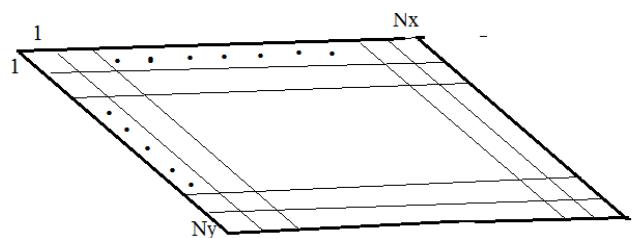


Рис. 1. Модель распределенного объекта

Передаточная матрица такого объекта, будет иметь следующий вид

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & \dots & W_{1j} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & \dots & W_{2m} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & \dots & W_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{i1} & W_{i2} & W_{i3} & \dots & W_{ij} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где j – соответствует N_x , а i - соответствует N_y

Функциональная схема системы управления имеет вид, приведенный на рис. 2:

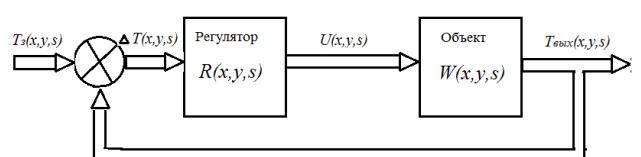


Рис. 2. Система управления с регулятором

OY – объект управления; $R(x,s)$ – распределенный высокоточный регулятор.

Сигнал на входе регулятора равен разнице между сигналом задания и сигналом обратной связи т.е.

$$\Delta T(x,\tau) = T_3(x) - T_{BIX}(x,\tau).$$

где $T_3(x,y,\tau)$ – сигнал задания; $T_{BIX}(x,y,\tau)$ – сигнал обратной связи; $\Delta T(x,y,\tau)$ – сигнал рассогласования.

В соответствии с литературой [1] передаточная функция пропорционального регулятора для такого объекта имеет вид:

$$R(x,s) = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G}{n_1} \right), \quad (2)$$

где G – обобщенная координата; S – оператор Лапласа

n_1 – весовой коэффициент усилительного распределенного звена;

E_1 – коэффициенты пропорциональности усиливательного распределенного звена.

С учетом выше сказанного получим входное воздействие на объект $U(x,y,\tau)$ равно:

$$U(x,y,s) = \Delta T(x,y,s) \cdot R(x,y,s) = \\ \left(E_1 \frac{n_1 - 1}{n_1} \Delta T(x,y,s) - E_1 \frac{1}{n_1} \nabla^2 \Delta T(x,y,s) \right). \quad (3)$$

Приведем уравнение (3) к дискретной форме записи. Для этого произведем замену переменных x , y и τ их целочисленными аналогами η и γ . С учетом этого, в дискретном виде получим

$$U(\eta, \gamma) = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} \Delta T(\eta, \gamma) - \frac{1}{n_1} \cdot \nabla^2 \Delta T(\eta, \gamma) \right),$$

$$\nabla^2 \Delta T(i, \gamma) = \frac{\Delta T(\eta+1, \gamma) - 2 \cdot \Delta T(\eta, \gamma) + \Delta T(\eta-1, \gamma)}{\Delta x_{23}^2} + \\ \frac{\Delta T(\eta+1, i) - 2 \cdot \Delta T(\eta, i) + \Delta T(\eta-1, i)}{\Delta y_{23}^2},$$

где – ρ количество циклов по времени, Δx – шаг дискретизации по координате X , Δy – шаг дискретизации по координате, $\Delta \tau$ – шаг дискретизации по времени для второй зоны регулирования мощности, когда расстояние между зонами нагрева с датчиками температуры, одинаковые Δx_{23}^2 ;

Рассмотрим объект 3 на 3. Тогда дискретные формулы регулятора будут выглядеть соответственно:

– для пропорциональной части регулирующего воздействия первой зоны по оси x регулирования мощности:

$$U_{1p}(2, \gamma) = \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(2, \gamma) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(3, \gamma) - \Delta T(2, \gamma)}{\Delta x_{23}^2} - \frac{\Delta T(2, \gamma) - \Delta T(1, \gamma)}{\Delta x_{12}^2} \right) \right) + \\ \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(2, i) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(3, i) - \Delta T(2, i)}{\Delta y_{23}^2} - \frac{\Delta T(2, \gamma) - \Delta T(1, i)}{\Delta y_{12}^2} \right) \right)$$

– для пропорциональной части второй зоны по оси x регулирования мощности;

$$U_{2p}(2, \gamma) = \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(3, \gamma) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(4, \gamma) - 2 \Delta T(3, \gamma) + \Delta T(2, \gamma)}{\Delta x_{23}^2} \right) \right) + \\ \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(3, i) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(4, \gamma) - 2 \Delta T(3, \gamma) + \Delta T(2, \gamma)}{\Delta y_{23}^2} \right) \right)$$

– для пропорциональной части третьей зоны по оси x регулирования мощности;

$$U_{3p}(3, \gamma) = \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(4, \gamma) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(5, \gamma) - \Delta T(4, \gamma)}{\Delta x_{12}^2} - \frac{\Delta T(4, \gamma) - \Delta T(3, \gamma)}{\Delta x_{23}^2} \right) \right) + \\ \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(3, i) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(4, i) - 2 \Delta T(3, i) + \Delta T(2, i)}{\Delta y_{23}^2} \right) \right)$$

– для пропорциональной части регулирующего воздействия первой зоны по оси y регулирования мощности:

$$U_{1p}(2, \gamma) = \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(2, \gamma) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(3, \gamma) - \Delta T(2, \gamma)}{\Delta y_{23}^2} - \frac{\Delta T(2, \gamma) - \Delta T(1, \gamma)}{\Delta y_{12}^2} \right) \right) + \\ \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(2, i) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(3, i) - \Delta T(2, i)}{\Delta x_{23}^2} - \frac{\Delta T(2, \gamma) - \Delta T(1, i)}{\Delta x_{12}^2} \right) \right)$$

– для пропорциональной части второй зоны по оси y регулирования мощности;

$$U_{2p}(2, \gamma) = \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(3, \gamma) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(4, \gamma) - 2 \Delta T(3, \gamma) + \Delta T(2, \gamma)}{\Delta y_{23}^2} \right) \right) + \\ \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(3, i) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(4, \gamma) - 2 \Delta T(3, \gamma) + \Delta T(2, \gamma)}{\Delta x_{23}^2} \right) \right)$$

– для пропорциональной части третьей зоны по оси y регулирования мощности;

$$U_{3p}(3, \gamma) = \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(4, \gamma) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(5, \gamma) - \Delta T(4, \gamma)}{\Delta y_{12}^2} - \frac{\Delta T(4, \gamma) - \Delta T(3, \gamma)}{\Delta y_{23}^2} \right) \right) + \\ \left(\frac{E_1(n_1 - 1)}{n_1} \Delta T(3, i) - \frac{E_1}{n_1} \left(\frac{\Delta T(4, i) - 2 \Delta T(3, i) + \Delta T(2, i)}{\Delta x_{23}^2} \right) \right)$$

Реализация пропорционального распределенного регулятора на программируемом логическом контролере ПЛК-150-UL, поставляемый фирмой «Owen», приведена на рис № 3-5. Данный контроллер имеет возможность расширения до восьми программируемых аналоговых входов (в нашем случае запрограммированные для работы с датчиками типа ТХК(L)) и два аналоговых выхода (унифицированным сигналом (0-10В)

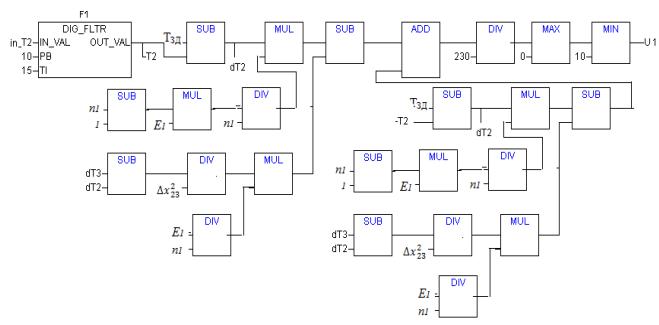


Рис. 3 Пропорциональная составляющая закона управления для 1 зоны нагрева распределенного регулятора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации регулятора потребуется 9 блоков подобных блоку, изображенному на рис. 3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров А.Г. Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД регуляторов в технических системах // Труды участников конференции УКИ'12. Научное издание. Электрон. текстовые дан. – М: ИПУ РАН, 2012. – С. 36-48.
2. Александров А.Г. Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД регуляторов в технических системах // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – С. 16-30.
3. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: Изд-во РИА КМВ, 2007. – 244с.
4. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 2.
5. 27 сентября 2019 года. – Нижний Архыз, 2019. – С. 8-18.
6. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007. – 243 с. – ISBN 9785893140750.
7. Зайцев С.В. Повышение эффективности инженерного образования при использовании моделирующих лабораторных комплексов с удаленным доступом // Машиностроение и инженерное образование. – 2012. – № 1. – С. 57-65.

Единый секторный критерий устойчивости распределенных систем

Чернышев Александр Борисович
Пятигорский институт СКФУ
Пятигорск, Россия
chalbor@rambler.ru

Антонов Владимир Феохарович
Пятигорский институт СКФУ
Пятигорск, Россия
antonouptu@mail.ru

Майрансаев Зураб Русланович
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский
горно-металлургический институт
Владикавказ, Россия
sarmat007@inbox.ru

Аннотация. Целью исследования является обобщение известных из теории систем с сосредоточенными параметрами методов анализа устойчивости для распределенных систем. Задачей исследования является разработка новых критериев устойчивости для класса распределенных систем. Основным результатом исследования является формулировка единого секторного критерия, включающего в себя, как частные случаи, известные ранее критерии.

Annotation. The aim of the study is to summarize well-known systems in theory with concentrated parameters of methods of analysis of resistance for distributed systems. The aim of the study is to develop new sustainability criteria for the class of distributed systems. The main result of the study is the formulation of a single sectoral criterion, which includes, as private cases, known to previous criteria.

Ключевые слова: распределенные системы, нелинейная характеристика, устойчивость, пространственный годограф.

Keywords: distributed systems, non-linear characteristics, stability, spatial godographer.

I. ВВЕДЕНИЕ

Управление системами с распределенными параметрами является одним из сложных и важных разделов кибернетики, как науки об управлении, информации и системах. Необходимость изучения и развития данной научной дисциплины связана с тем, что для управления многими объектами приходится учитывать их геометрические параметры, то есть их пространственную протяженность. Без учета этих параметров не всегда возможно добиться требуемой точности и адекватности управления. К объектам и системам с распределенными параметрами относятся: теплопроводность, диффузия, упругость и пластичность, электромагнитные поля, аэродинамика, гидродинамика, квантовая физика. В самом общем случае, к системам с распределенными параметрами можно отнести не только системы с объектами, параметры которых геометрические координаты, но и любые другие системы, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных. К настоящему времени в области теории систем с распределенными параметрами получено много результатов, однако по большей части эти результаты направлены на исследование линейных систем. В процессе исследования нелинейных автоматических систем, в качестве одной из основных задач, решается

задача поиска возможных состояний равновесия исследуемой системы. Важнейшими задачами являются также исследование устойчивости таких систем.

Одним из самых распространенных методов исследования распределенных систем является метод модального управления. В основу метода положено разложение входного воздействия на объект в ряды по собственным функциям, например, в ряды Фурье. В результате такого разложения появляется возможность декомпозиции общей задачи на несколько отдельных подзадач. Задача синтеза решается для каждой отдельной моды (гармоники ряда). Необходимо отметить, что при использовании этого метода учитывается конечное число мод, что вполне естественно приводит к погрешности решения относительно первоначальной задачи. Особое внимание следует обратить на применение частотного метода синтеза регуляторов. Этот метод наиболее удобен при проектировании систем с одним входом и одним выходом. Важное значение, рассмотрение этого метода состоит в том, что основные подходы и результаты, полученные и применимые для исследования сосредоточенных систем, могут быть адаптированы при выполнении определенных условий к распределенным системам.

Одной из основных проблем, на решение которых направлены усилия ученых в данной области в последнее время является разработка общих подходов и определенных общих основ теории нелинейных систем. Основные успехи в этом направлении связаны с выделением из большого количества видов нелинейных систем такого класса систем, структура которых позволяет отдельно выделить нелинейный элемент, являющийся безынерционным и статическим. Наличие отдельного линейного звена дает возможность использовать аппарат передаточных функций для исследования нелинейной системы.

В процессе исследования нелинейных автоматических систем, в качестве одной из основных задач, решается задача поиска возможных состояний равновесия исследуемой системы. Важнейшими задачами являются также исследование устойчивости таких систем, поиск наличия периодических колебаний, а также определение установившихся состояний и процессов перехода систем к этим состояниям, с учетом начальных отклонений. Системы с распределенными параметрами – системы,

для которых изменение управляемых величин, как во времени, так и в пространстве описывается чаще всего дифференциальными уравнениями в частных производных. Физически появление частных производных соответствует учету волновых явлений или гидравлического удара в трубопроводах, учету волновых процессов в длинных линиях электропередач, учету пространственной неравномерности распределения температуры при нагреве металлических заготовок и т.д.

Методика анализа устойчивости нелинейных распределенных систем в настоящее время, в общем виде не разработана. Представление углового коэффициента прямой, ограничивающей сектор нелинейной характеристики, в виде коэффициента усиления пространственно-усилительного звена, позволяет сформулировать частотные критерии абсолютной устойчивости, адаптированные к классу систем с распределенными параметрами.

Анализ систем управления, в частности анализ их устойчивости – одна из самых важных задач исследования систем. С технической точки зрения, устойчивость систем управления является свойством, при котором система работает стабильно в нормальном режиме функционирования [1]. Рассмотрим нелинейные системы, в которых возможно выделение нелинейной части в качестве отдельного звена, последовательно соединенного с линейным устойчивым звеном. В этом случае имеется возможность использовать достаточно развитый в теории аппарат передаточных функций, который практически невозможно использовать для нелинейных систем общего вида. Частотные методы анализа и синтеза позволяют обобщить некоторые положения, известные из теории сосредоточенных систем для систем с распределенными параметрами [2, 3].

II. ОБОБЩЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ КРИТЕРИЕВ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Задача об исследовании абсолютной устойчивости нелинейных систем управления возникает в связи с тем, что в некоторых случаях нелинейная характеристика является нестабильной и может быть охарактеризована только определенной областью.

Известна гипотеза, выдвинутая М.А. Айзermanом о том, что если заменить нелинейный элемент (НЭ) линейным усилительным звеном и если линеаризованная таким образом система устойчива для всех значений углового коэффициента от нуля до k , то положение равновесия системы с любым нелинейным элементом принадлежащим углу $[0, k]$ будет абсолютно устойчивым.

Однако в последствии были найдены примеры, когда положения равновесия систем, для которых выполняются условия гипотезы Айзermanа, не являлись устойчивыми в целом. Таким образом условия гипотезы Айзermanа можно считать необходимыми, но не достаточными.

В.М. Поповым предложен частотный критерий определения абсолютной устойчивости, то есть устойчивости системы при любых начальных отклонениях, для любой формы нелинейной характеристики, принадлежащей к некоторому определенному классу.

Критерий Попова основан на гипотезе Айзermanа, но при этом является достаточным условием абсолютной устойчивости. Среди частотных методов исследования абсолютной устойчивости, известен также «круговой критерий». Нелинейный элемент с нестационарной статической характеристикой располагается в секторе, ограниченном двумя прямыми проходящими через начало координат [4, 5].

Частотные методы исследования абсолютной устойчивости удобны не только для анализа, но и для синтеза нелинейных систем. При заданной линейной части (ЛЧ) не представляется затруднительным определение максимального угла сектора, которому должна принадлежать статическая характеристика нелинейного элемента систем с абсолютно устойчивым положением равновесия.

Используя прием разложения функций, описывающих распределенные сигналы в ряды, согласно общей теории рядов Фурье, рассмотрим класс СРП, в которых допустимо разложение по собственным функциям. Благодаря такой возможности, передаточная функция, описывающая объект с РП может быть представлена в виде некоторой совокупности передаточных функций по отдельным пространственным модам [6,7]. Для учета пространственных координат вводится понятие «обобщенная координата».

Коэффициент усиления пространственно-усилительного звена по каждой гармонике ряда входного воздействия может быть записан в виде:

$$K_{\eta, \gamma, \xi} = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} (\Psi_\eta^2 + \tilde{\Psi}_\gamma^2) \right], \quad (1)$$

$$(\eta, \gamma = \overline{1, \infty}; \xi = \overline{1, 4}), \quad \Psi_\eta = \frac{\pi \eta}{l_x}; \quad \tilde{\Psi}_\gamma = \frac{\pi \gamma}{l_y},$$

Обозначим:

$$\tilde{G}(\eta, \gamma) = \Psi_\eta^2 + \tilde{\Psi}_\gamma^2, \quad (2)$$

Тогда можно записать:

$$K(G) = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right], \quad 0 \leq G \leq \infty. \quad (3)$$

Передаточная функция пространственно-инвариантного объекта по n -й моде входного воздействия может быть представлена в виде:

$$KW_n(s) = \frac{\exp(\beta_n \cdot \bar{y}) + \exp(-\beta_n \cdot \bar{y})}{\exp(\beta_n \cdot l_y) + \exp(-\beta_n \cdot l_y)}, \quad (4)$$

$$(n = \overline{1, \infty}), \quad \Psi_n = \frac{\pi n}{l_x}.$$

III. ЧАСТОТНЫЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Наиболее распространенным частотным критерием устойчивости линейных систем является критерий Найквиста, суть которого сводится к следующему утверждению: Замкнутая система управления устойчива, если годограф частотной характеристики передаточной функции $W(j\omega)$ разомкнутой системы не охватывает на комплексной плоскости точку с координатами $(-1, j0)$. На рис. 1 приведена графическая интерпретация критерия Найквиста: если передаточная функция разомкнутой системы не имеет полюсов, лежащих в правой полуплоскости,

тогда для устойчивости замкнутой системы достаточно, чтобы пространственный годограф разомкнутой системы не охватывал линию $\{\text{Im}(W)=0; \text{Re}(W)=-1; G\}$.

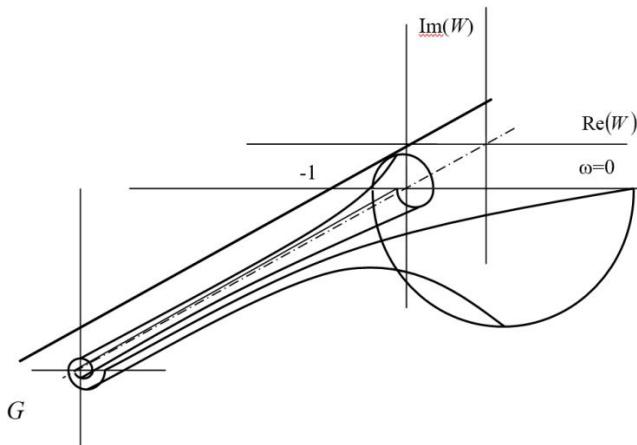


Рис. 1. Графическая интерпретация критерия Найквиста

В этом случае частотная характеристика каждого контура системы не охватит точку с координатами $\text{Im}(W)=0; \text{Re}(W) = -1$. Каждый контур системы будет устойчив, а, следовательно, будет устойчива и вся система. Однако, критерий Найквиста приемлем для исследования только линейных систем.

Рассмотрим возможности обобщения частотных критериев устойчивости нелинейных распределенных систем. Для указанного класса систем характеристика нелинейного элемента ограничена некоторым сектором. Для распределенных систем, коэффициент k рассматривается как коэффициент усиления пространственно-усилительного звена [8–10].

Коэффициент усиления пространственно-усилительного звена:

$$K_{\eta,\gamma,\xi} = E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} (\Psi_\eta^2 + \Psi_\gamma^2) \right], \quad (5)$$

$$(\eta, \gamma = \overline{1, \infty}; \xi = \overline{1, 4}),$$

Используя обобщенную координату, выражение коэффициента усиления (5) может быть записано в виде:

$$K(G) = E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right], \quad 0 \leq G \leq \infty. \quad (6)$$

Поверхность, ограничивающая пространственную область:

$$\begin{aligned} z &= E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] \cdot \sigma = \\ &= E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \right] \cdot \sigma(x, y, t) = \\ &= E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} \sigma(x, y, t) - \frac{1}{n_1} \left(\frac{\partial^2 \sigma(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma(x, y, t)}{\partial y^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Если нелинейное входное воздействие не зависит от пространственных координат x, y , то выражение примет вид:

$$z = E_1 \frac{n_1-1}{n_1} \cdot \sigma(t), \quad k = E_1 \frac{n_1-1}{n_1}. \quad (8)$$

Значение углового коэффициента k будет зависеть только от заданного коэффициента усиления E_1 и от весового коэффициента n_1 , подбор которых позволит минимизировать сектор, которому принадлежит нелинейная характеристика. Вид поверхности в виде изображения по Лапласу:

$$z = E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] \cdot \sigma(x, y, t), \quad k = E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right]. \quad (9)$$

Прямые, ограничивающие сектор нелинейной характеристики сверху, образуют поверхность, форма которой зависит от весового коэффициента n_1 , общего коэффициента усиления E_1 и обобщенной координаты G . При возрастании весового коэффициента n_1 поверхность выпрямляется, при $n_1 \rightarrow \infty$ представляет собой плоскость.

Графическая интерпретация обобщенного критерия Попова: Для абсолютной устойчивости замкнутой системы достаточно, чтобы модифицированный пространственный годограф не пересекал поверхность, проходящую через линию:

$$\left\{ \text{Re}(W) = \frac{1}{E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right]}, \text{Im}(W) = 0 \right\} \quad (10)$$

и прямую:

$$\{\text{Re}(W) = 0; \text{Im}(W) = q; G\}. \quad (11)$$

IV. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ АБСОЛЮТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

В теории систем с сосредоточенными параметрами известен круговой критерий абсолютной устойчивости систем управления. Этот критерий отличается тем, что нелинейная характеристика может быть нестационарной [11].

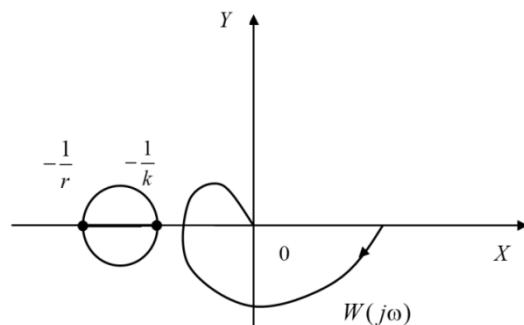


Рис. 2. Иллюстрация кругового критерия абсолютной устойчивости для сосредоточенных систем

Положение равновесия нелинейной системы с нестационарным нелинейным элементом абсолютно устойчиво, если амплитудно-фазовая характеристика устойчивой линейной части не охватывает точек круга с центром на действительной оси. На рис. 2 приведена иллюстрация кругового критерия абсолютной устойчивости для сосредоточенных систем. Для кругового критерия используется обычная, не модифицированная частотная характеристика линейной части, в отличие от критерия Попова. Определим параметры круга: диаметр, радиус и центр:

$$D = \frac{1}{r} - \frac{1}{k}, R = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{k} \right), \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{k} \right); 0 \right). \quad (12)$$

Уравнение окружности будет иметь вид:

$$\left(X + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{k} \right) \right)^2 + Y^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{k} \right)^2. \quad (13)$$

Рассмотрим коэффициенты k и r как коэффициенты усиления пространственно-усилительного звена:

$$K(G) = E_1 \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right], \quad 0 \leq G \leq \infty. \quad (14)$$

Уравнения прямых, ограничивающих сектор нелинейности, для каждого контура можно записать в виде:

$$\begin{aligned} z_{kn} &= E_k \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_n \right] \sigma_n, \\ z_{rn} &= E_r \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_n \right] \sigma_n. \end{aligned} \quad (15)$$

Угловые коэффициенты прямых, образующих сектор нелинейности, примут вид:

$$k_n = E_k \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_n \right] \sigma_n, r_n = E_r \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_n \right]. \quad (16)$$

Множество прямых, ограничивающих сектор нелинейной характеристики, образуют гиперболические поверхности, форма которых зависит от весового коэффициента n_1 , общих коэффициентов усиления E_k и E_r , от обобщенной координаты G . При возрастании весового коэффициента n_1 гиперболические поверхности выпрямляются, при $n_1 \rightarrow \infty$ представляют собой плоскости. При увеличении общих коэффициентов усиления произойдет увеличение угловых коэффициентов k и r для каждого из значений G . Рассмотрим коэффициенты прямых, ограничивающих сектор нелинейности, для каждого контура при значении весового коэффициента $n_1 \rightarrow \infty$. Это ситуация, когда входное воздействие нелинейного элемента не зависит от пространственных координат, а, следовательно, и от обобщенной координаты G . Из уравнений (15) получим: $k=E_k$; $r=E_r$. В этом случае для каждого контура угловые коэффициенты прямых будут оставаться неизменными и зависят только от постоянных общих коэффициентов усиления. Тогда для каждого контура параметры круга останутся неизменными.

Частотный круговой критерий для нелинейных систем с распределенными параметрами, при нелинейной характеристике, не зависящей от пространственных координат может быть сформулирован следующим образом: Пусть нелинейная характеристика $z=\varphi(\sigma, t)$ принадлежит сектору $[r, k]$ для всех значений t , т.е. выполняется условие:

$$\varphi(0, t) = 0; rx \leq \varphi(\sigma, t) \leq kx. \quad (17)$$

Положение равновесия нелинейной распределенной системы с нестационарным нелинейным элементом, не зависящим от пространственных координат, абсолютно устойчиво, если пространственный годограф линейной части, распределенной системы не охватывает точек цилиндра с осью на действительной оси, при $k=E_k$; $r=E_r$, проходящей через точки:

$$\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{k} \right); 0 \right), \quad (18)$$

радиусом:

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{k} \right) \quad (19)$$

для всех независимых контуров.

V. Единый секторный критерий абсолютной устойчивости распределенных систем

В реальных системах с распределенными параметрами, чаще всего входное воздействие зависит от пространственных координат. Рассмотрим ситуацию при значении весового коэффициента $n_1=1$. Угловые коэффициенты прямых, образующих сектор нелинейности, примут вид:

$$k = E_k G, \quad r = E_r G. \quad (20)$$

Координата центра окружности по действительной оси и радиус примут вид:

$$X_0 = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_r G} + \frac{1}{E_k G} \right) = -\frac{1}{2} \left(\frac{E_k + E_r}{E_r E_k G} \right). \quad (21)$$

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_r G} - \frac{1}{E_k G} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{E_k - E_r}{E_r E_k G} \right). \quad (22)$$

Найдем пределы координаты центра окружности по действительной оси и радиуса окружности при стремлении обобщенной координаты к бесконечности. Получим:

$$\lim_{G \rightarrow \infty} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{E_k + E_r}{E_r E_k G} \right) \right] = 0; \quad \lim_{G \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{E_k - E_r}{E_r E_k G} \right) \right] = 0. \quad (23)$$

Таким образом, при увеличении значения обобщенной координаты G , окружности каждого последующего контура будут приближаться к началу координат и уменьшаться по радиусу. Частотный круговой критерий для нелинейных систем с распределенными параметрами, при произвольной нестационарной нелинейной характеристике, может быть сформулирован следующим образом: Пусть нелинейная характеристика $z=\varphi(\sigma, t)$ принадлежит сектору $[r, k]$ для всех значений t , т.е. выполняется условие:

$$\varphi(0, t) = 0; rx \leq \varphi(\sigma, t) \leq kx. \quad (24)$$

Положение равновесия нелинейной распределенной системы с нестационарным нелинейным элементом, абсолютно устойчиво, если пространственный годограф линейной части, распределенной системы не охватывает точек круга с центром на действительной оси:

$$\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{k} \right); 0 \right), \quad (25)$$

радиусом:

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{k} \right), \quad (26)$$

где для всех независимых контуров:

$$k_n = E_k \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_n \right]; \quad r_n = E_r \left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G_n \right]. \quad (27)$$

Полученный обобщенный круговой критерий, при предельных положениях прямых, ограничивающих сектор нелинейной характеристики можно считать единым секторным критерием устойчивости распределенных систем. При этом:

Если $R = 0$, т.е. $k=r=1$, то получаем условия критерия Найквиста.

Если $r=0$, $k \geq 0$, $R \rightarrow \infty$, при условии использования модифицированного годографа, получаем условия критерия В-М. Попова.

Если входное воздействие нелинейного элемента не зависит от пространственных координат, угловые коэффициенты прямых будут оставаться неизменными, для каждого контура параметры круга останутся неизменными, то получаем условия цилиндрического критерия.

Таким образом, известные критерии устойчивости класса систем с распределенными параметрами с нелинейной характеристикой, график которой ограничен сектором, являются частными случаями, сформулированного единого секторного критерия устойчивости.

VI. ВЫВОДЫ

Проведен анализ теоретических положений, относящихся к анализу устойчивости линейных сосредоточенных систем. Для линейных систем, характер возмущающего воздействия не влияет на их устойчивость. Устойчивость зависит от внутренней структуры самой системы. Частное решение не влияет на устойчивость, при анализе систем автоматического управления, решение вопроса об устойчивости сводится к анализу характера свободного движения системы. Характер свободного движения системы определяется видом решения однородного дифференциального уравнения.

Для анализа устойчивости системы или отдельного звена применяются критерии устойчивости, для использования которых не требуется вычисление корней характеристического уравнения. Рассмотрены частотные критерии Найквиста

Рассмотрены нелинейные системы автоматического управления, которые структурно представляются в виде соединения линейной части и нелинейного элемента.

Выделен класс распределенных систем, в которых допустимо разложение по собственным функциям. В выделенном классе систем объект управления является пространственно-инвариантным. Приводятся формы передаточных функций для пространственно-инвариантных систем, а также выражение передаточных функций через обобщенную координату.

Исследованы частотные критерии устойчивости распределенных систем. Приведена графическая интерпретация критерия Найквиста.

Разработан и сформулирован цилиндрический критерий абсолютной устойчивости нелинейных распределенных систем, на базе обобщения кругового критерия. Приведена иллюстрация пространственного сектора нелинейности.

Разработан обобщенный круговой критерий устойчивости распределенных систем, на основе которого сформулирован единый секторный критерий устойчивости класса распределенных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск : Рекламно-информ. агентство на КМВ, 2007. – 243 с. – ISBN 9785893140750.
2. Суразметинов Т.К. Устойчивость систем с распределенными параметрами. – Новосибирск: Наука, 1987. – 232 с.
3. Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х. и др. Теория автоматического управления / под ред. В.Б. Яковleva. – М.: Высшая школа, 2003.
4. Panoporm Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
5. Чернышев А.Б. Обобщение методов анализа устойчивости для распределенных систем. // Современная наука и инновации. – 2015. – № 3 (11). – С. 16-22.
6. Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Ильюшин Ю.В. Моделирование релейно-импульсных распределенных систем. – Пятигорск: Изд-во ПГТУ, 2012. – 248 с.
7. Чернышев А.Б. Модифицированный годограф пространственно-апериодического звена // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 2(1). – С. 159-163.
8. Martirosyan A.A., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Application of Fourier series in distributed control systems simulation // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. – 2019. – P. 609-613.
9. Martirosyan A.A., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Methods of distributed systems' structured modelling // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016. – 2016. – P. 283-289.
10. Martirosyan A.V., Chernyshev A.B., Martirosyan K.V. Calculation of the first switch-on time of distributed objects control action // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2020. – 2020. – P. 750-754.
11. Martirosyan K.V., Chernyshev A.B., Martirosyan A.V., Tatyana K.V. Formation of the anterior heating function under the action of uniformly distributed sources // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2020. – 2020. – P. 755-760..

Влияние расположения скважин на суммарный дебит

Першин Иван Митрофанович

Пятигорский инситут (филиал) СКФУ
веро-Кавказский федеральный университет
Пятигорск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru

Русак Светлана Николаевна

Пятигорский инситут (филиал) СКФУ
веро-Кавказский федеральный университет
Пятигорск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru

Малков Анатолий Валентинович

ООО «Нарзан-гидроресурсы,
Кисловодск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru

Носова Виктория Андреевна

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия
kaf-utbs@pfnfc.ru

Аннотация. Многие гидролитосферные процессы имеют различные коэффициенты фильтрации по пространственным координатам. Для описания статических и динамических характеристик таких гидролитосферных процессов в работе приводится структура аппроксимирующих звеньев и процедура определения параметров рассматриваемых звеньев. При этом, для определения параметров, могут быть использованы результаты опытно-фильтрационных работ или результаты численного моделирования гидролитосферных процессов. Рассмотрено решение задачи оптимизации расположения скважин в заданном секторе.

Annotation. Many hydro lithospheric processes have different filtration coefficients according to spatial coordinates. To describe the static and dynamic characteristics of such hydro lithospheric processes, the structure of approximating links and the procedure for determining the parameters of the considered links are given. At the same time, the results of experimental filtration work or the results of numerical modeling of hydro lithospheric processes can be used to determine the parameters. The solution of the problem of optimizing the location of wells in a given sector is considered.

Ключевые слова: опытно-фильтрационные исследования, расположение скважин в секторе, гидролитосферные процессы.

Keywords: experimental filtration studies, the location of wells in the sector, hydrolithospheric processes.

I. ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ СКВАЖИН НА СУММАРНЫЙ ДЕБИТ

В статье «Проектирование распределенной системы управления кустом скважин» (см. настоящий сборник) предполагалось, что добывающие скважины располагаются по координате x . Решение задачи проектирования систем управления и возникающие проблемы достаточно подробно рассмотрено в литературе [1–4].

Положим, что рассматриваемое месторождение позволяет перемещать добывающие скважины в секторе fs (где fs – заданное значение угла). При этом, будем полагать, что скважины располагаются на отрезке длиной Lsk (рис. 1).

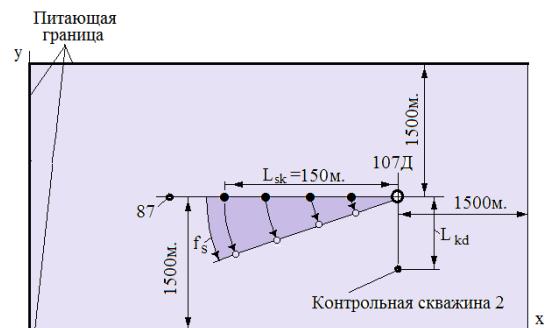


Рис. 1. Сектор расположения добывающих скважин

Положим, что имеется дополнительная контрольная скважина 2 (см. рис. 1), измеряющая состояние гидролитосферного процесса в нижнем валанжине, в точке $z=0.5 \cdot LZ_2$.

Для вычисления суммарного дебита скважин при перемещении добывающих скважин в секторе fs воспользуемся следующей процедурой:

1) Используя верифицированную модель объекта, определим коэффициент гидравлического взаимодействия скважин $K_3 =$ (понижение уровня в контрольной скважине 2/средний дебит):

$$K_3 = (-0.147)/(-508) = 0.00028937 \dots$$

(На рис. 2 приведен график изменения уровня в контрольной скважине 2 ($L_{kd} = 80\text{м.}$), построенный по результатам моделирования верифицированной модели объекта управления. При этом, дебит добывающей скважины $Q=508 \text{ м}^3/\text{сут.}$).



Рис. 2. График переходного процесса в контрольной скважине 2

2) Определим параметры модифицированного аппроксимирующего звена для случая, когда коэффициенты фильтрации по пространственным координатам x и y различны. Структура звена, аппроксимирующего статические коэффициенты, может быть записана в виде:

$$W_a = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (x_0^2 + (K_n \cdot y_0)^2)^{0.5})$$

$$\beta = (D)^{1/2}, x_0 = r_0, y_0 = r_0$$

В соответствии с разработанной процедурой определим параметры аппроксимирующего звена:

2.1) Приравнивая статические коэффициенты усиления аппроксимирующего звена значению K_1, K_2 и K_3 (полагая, что $L_1 - r_0 \approx L_1; L_2 - r_0 \approx L_2$, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x_0), \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ K_3 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_p \cdot L_{kd}), \beta = (D)^{1/2} \end{cases} \quad (1)$$

2.2) Подставляя вычисленные значения, $K_1=0.0224$, $K_2=0.00236$, $r_0=0.2$, $r_2=180$, $K_3=0.00028973$, $L_{kd}=80$ в (1), получим:

$$\begin{cases} 0.0224 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 0.2), \\ 0.00236 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 180), \\ 0.00028937 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_p \cdot 80), \beta = (D)^{1/2} \end{cases}$$

Решая полученную систему, придем к следующему результату: $K=0.00028106$; $D=0.00015665$, $K_p=4.346$.

Коэффициент гидравлического взаимодействия скважин рассматриваемого объекта записывается в виде:

$$W_a = \frac{0.00028106}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (x^2 + (4.346 \cdot y)^2)^{0.5})$$

$$\beta = (0.00015665)^{1/2}. \quad (2)$$

На рис. 3 приведены графики изменения коэффициента гидравлического взаимодействия скважин:

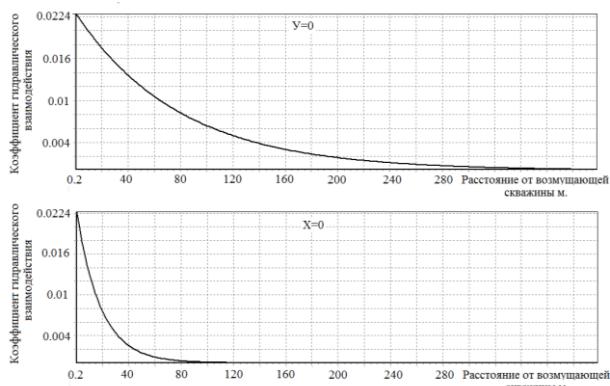


Рис. 3. Графики коэффициентов гидравлического взаимодействия

Графики показывают, что коэффициенты фильтрации по пространственным координатам x и y различны.

Решение задачи определения параметров аппроксимирующих звеньев, для случая, когда коэффициенты фильтрации по координатам x и y одинаковы, рассмотрено в [1, 5–9]. Используя аппроксимирующее звено (2), может быть оптимизировано не только число скважин, но и размещение этих скважин.

Постановка задачи оптимизации выбора расположения скважин в секторе fs : для рассматриваемого месторождения (имеющего n добывающих скважин, расположенных на отрезке L_{sk}) требуется определить значение $f_{st} \leq fs$, обеспечивающее максимальную прибыль (ΔD) за десять лет эксплуатации месторождения. При этом будем полагать:

добыча гидроминерального сырья осуществляется в течение 3650 суток;

$$r_{0,i} = 0.2 \text{ м. (радиус колодца [1])};$$

$N=300/1000000$ млн. руб (стоимость 1 м³ гидроминерального сырья); $C_p = 6$ млн. руб. (затраты на обустройство и содержание одной скважины в течение 10 лет); налог на недропользование 7.5 %; $\Pi_p = 87$ млн. руб. (расходы на содержание зданий и оборудования и персонала за десять лет эксплуатации); расположение добывающих скважин показано на рис.1, ($L_{sk}=150$ м.);

заданное понижение уровня в скважинах составляет 12 м.; $f_s=15$ м;

полученный выше коэффициента гидравлического взаимодействия скважин записывается в виде:

$$W_a = \frac{0.00028106}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (x^2 + (4.346 \cdot y)^2)^{0.5})$$

$$\beta = (0.00015665)^{1/2}.$$

Вычисленный коэффициента гидравлического взаимодействия скважин учитывает различные коэффициенты фильтрации гидролитосферного процесса по пространственным координатам.

II. ПРОЦЕДУРА РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ РАСПАДАЕТСЯ НА СЛЕДУЮЩИЕ ЭТАПЫ

1) Влияние j -й добывающей скважины на понижение уровня в μ -добывающей скважине описывается следующим соотношением:

$$\Delta H_\mu = \frac{K_\mu \cdot Q_\mu}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (r_{0,\mu})) + \sum_{j=1, j \neq \mu}^n \frac{K_j \cdot Q_j}{\beta} \exp(-\beta \cdot (r_{\mu,j})), \beta = D^{1/2},$$

$$r_{\mu,j} = ((x_\mu - x_j)^2 + (y_\mu - y_j)^2)^{0.5}, \mu = 1..n, \quad (3)$$

где ΔH_μ – понижение уровня в рассматриваемой μ -й скважине ($\mu=1..n$);

$r_{0,j}$ – заданный радиус; x_μ, y_μ – координаты μ -й скважины; x_j, y_j – координаты j -й скважины; n – число скважин; Q_μ – дебит μ -ой скважины; Q_j – дебит j -ой скважины.

В рассматриваемом случае $K_{\mu}=K_j=K=0.00028106$; $D=0.00015665$, $K_p=4.346$

Полагая

$$C_{\mu} = \frac{K_{\mu}}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (r_{0,\mu})) , C_{\mu,j} = \frac{K_j}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot (r_{\mu,j})) , \beta = (G_1)^{1/2}$$

и преобразуя (3), получим матричное уравнение для определения дебитов добывающих скважин

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1, C_{1,2}, \dots, C_{1,n} \\ C_{2,1}, C_2, \dots, C_{2,n} \\ \dots \\ C_{n,1}, C_{n,2}, \dots, C_n \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \dots \\ \Delta H_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

2) Суммарный дебит (Q) может быть определен из соотношения:

$$Q = \sum_{\mu=1}^n Q_{\mu}.$$

3) Определим прибыль за десять лет эксплуатации месторождения:

$$\text{ДД} = (Q \cdot N - Q \cdot N \cdot 0.075) \cdot 3650 - C_p \cdot n - \text{Пр.}$$

Была составлена программа для расчета ДД при изменении числа добывающих скважин.

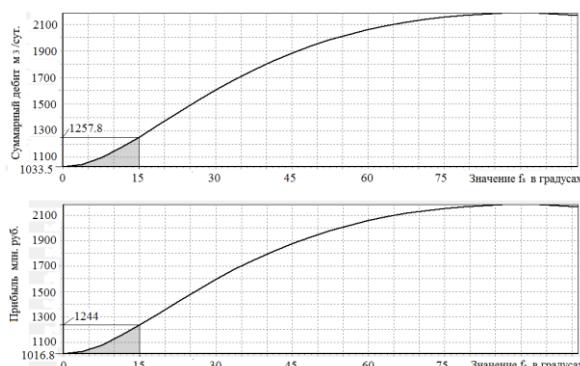


Рис. 4. Оптимизация расположения добывающих скважин в секторе f_s

По результатам расчетов построены графики, приведенные на рис.4. Как следует из графиков (см. рис. 4), максимальная прибыль достигается при расположении скважин на границе луча $f_{st} = f_s$. Эта прибыль, за 10 лет эксплуатации месторождения, составит 1244 млн.руб., а суммарный дебит $1257.8 m^3/sut$.

В рассматриваемом месторождении имеется ограничение на значение f_s . Полагая, что такое ограничение отсутствует, на рисунке 4 показано изменение прибыли и суммарного дебита при увеличении значения f_s .

Замечание. Оптимизация размещения добывающих скважин осуществляется, если коэффициенты фильтрации по пространственным координатам x и y различны!

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Малков А.В., Першин М.И., Помеляйко И.С. и др. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод // Системный анализ, диагностика, прогноз и управление. – М.: Наука 2015. – 283 с.
- Першин И.М., Веселов Г.Е., Малков А.В., Першин М.И. Коррекция дискретных математических моделей распределенных объектов // IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика». Сборник научных трудов. – Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 139-150.
- Першин И.М., Русак С.Н., Цаплева В.В. Оценка влияния шага дискретизации математических моделей распределенных объектов на динамические характеристики //IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика». Сборник научных трудов. Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 161-168.
- Першин М.И. Особенности распределенных объектов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Университетская наука - региону» (3-21 апреля). – Пятигорск: Изд-во ПФ СКФУ, 2017. – Т. 1. – С. 138-143.
- Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies. Сеп. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017. – Р. 032029.
- Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. Selection of optimal number of extracting wells // Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies. Сеп. "Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Power Supply of Mining Companies" 2017. – Р. 032030.
- Веселов Г.Е., Першин М.И., Першин И.М., Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. – 2015. – С. 106-117.
- Drovosekova T.I., Pershin I.M. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskie Mineralnye Vody (caucasus mineral springs) // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. – 2016. – Р. 215-217.
- Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Апроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 126-138.

Стенд для исследования распределенной системы передачи и приема информации в радиодиапазоне

Першин Иван Митрофанович

Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский федеральный университет
Пятигорск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru,

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
Санкт-Петербург, Россия

Санкин Александр Викторович

Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Северо-Кавказский федеральный университет
Пятигорск, Россия
kaf-utbs@pfncfu.ru

Аннотация. Распределенные системы передачи и приема информации исследуются сравнительно недавно. Теоретические разработки и некоторые практические результаты опубликованы в литературе. В статье рассмотрено создание стендада, для исследования распределенных систем, включающего: формирование полезных сигналов, пространственную модуляцию и передачу распределенного сигнала в радиодиапазоне; прием распределенной информации, пространственную демодуляцию принятого сигнала и выделение полезной информации.

Annotation. Distributed systems for transmitting and receiving information have been studied relatively recently. Theoretical developments and some practical results are published in the literature. The article considers the creation of a stand for the study of distributed systems, including: the formation of useful signals, spatial modulation and transmission of a distributed signal in the radio range; reception of distributed information, spatial demodulation of the received signal and the allocation of useful information.

Ключевые слова: распределенная система передачи и приема информации, распределенные фильтры, пространственные сканеры.

Keywords: distributed information transmission and reception system, distributed filters, spatial scanners.

I. ВВЕДЕНИЕ

1. Рассмотрим процедуру формирования распределенной информации для случая, когда формируемый распределенный сигнал зависит от одной пространственной координаты x (такие сигналы будем называть одномерными).

1.1. Положим, что передаваемые сигналы $C_i(\tau)$, ($i=1,\dots,N$) представлены в виде:

$$C_i(\tau) = \sum_{\xi=1}^M C_{i,\xi}(\tau) \cdot \sin(\omega_\xi \cdot \tau),$$

где $C_{i,\xi}(\tau)$ – полезная информация; ω_ξ – несущие частоты; N, M – целые числа.

$C_i(\tau)$, в [1, 4] носит название магистрали передачи информации (эта магистраль формируется из совокупности полезной информации $C_{i,\xi}(\tau)$, умноженной на $\sin(\omega_\xi \cdot \tau)$, (ω_ξ – локальные несущие частоты)).

1.2. Осуществим пространственную модуляцию передаваемых сигналов

$$U(x, \tau) = \sum_{i=1}^N C_i(\tau) \cdot \sin(\psi_i \cdot x), \quad \Psi_i = \frac{\pi \cdot i}{L_x}, 0 < x < L_x,$$

где L_x – заданный размер.

1.3. Выбирая несущую частоту f_0 , формируем распределенный сигнал выхода:

$$U_B(x, \tau) = U(x, \tau) \cdot \sin(f_0 \cdot \tau), \quad 0 < x < L_x,$$

Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован специальный стенд, в котором число точек дискретизации распределенного сигнала выхода $N=4$ (рис. 1).

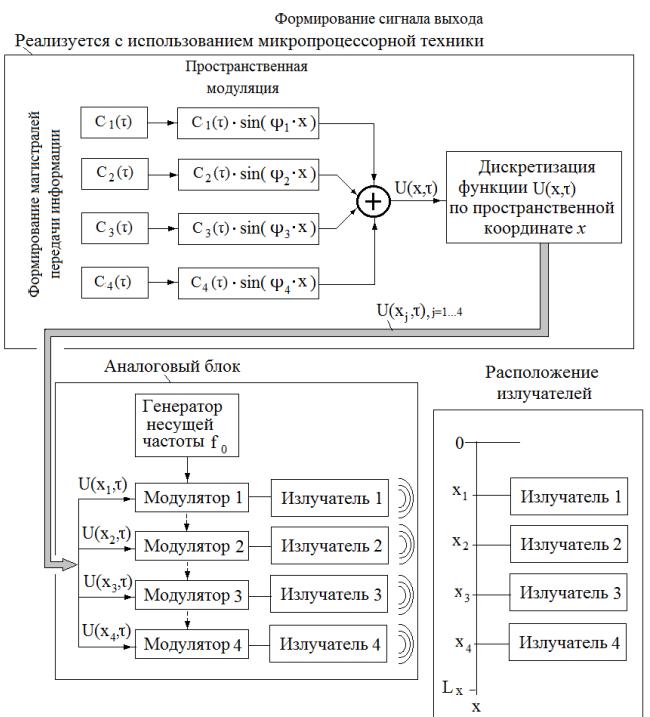


Рис. 1. Функциональная схема передающей части

Для передачи информации по 4 каналам. При проведении эксперимента для всех 4-х каналов использовалась одна общая несущая частота f_0 в интервале от 100 кГц до 500 кГц. Выбор диапазона частот несущей был ограничен скоростью обработки устройства АЦП, применяемого в данном случае.

2. Приемная часть стенда располагается на некотором расстоянии от передающей части. Процедура обработки принятой информации в приемной части стенда состоит из следующих этапов:

2.1. Входной сигнал принимается с помощью 4-х приемных устройств. Каждое устройство настроено на одну общую несущую частоту. Принятый сигнал подается на вход АЦП для оцифровки и последующей программной обработки.

Система позволяет регулировать уровни сигналов в заданных пределах.

Приемная часть стенда располагается на некотором расстоянии от передающей части. Процедура обработки принятой информации в приемной части стенда состоит из следующих этапов:

а) Входной распределенный сигнал принимается с помощью 4-х приемников (см. рис.2). Каждый приемник имеет входной контур, настроенный на общую несущую частоту f_0 , излучаемую передающей частью стенда. Далее сигнал подается на высокочастотный усилитель и после усиления и фильтрации на один из входов АЦП для оцифровки.

Уровни сигналов можно регулировать как электронным способом, так и изменением пространственного взаимоположения передающего излучателя и приемной антенны соответствующего канала. Имеется возможность переключения модулирующих сигналов между каналами передающей части стенда непосредственно во время работы стенда без отключения АЦП. Таким образом, можно осуществить проверку прохождения любого сигнала по соответствующему каналу, для исключения ошибочных решений при компьютерной обработке [5].

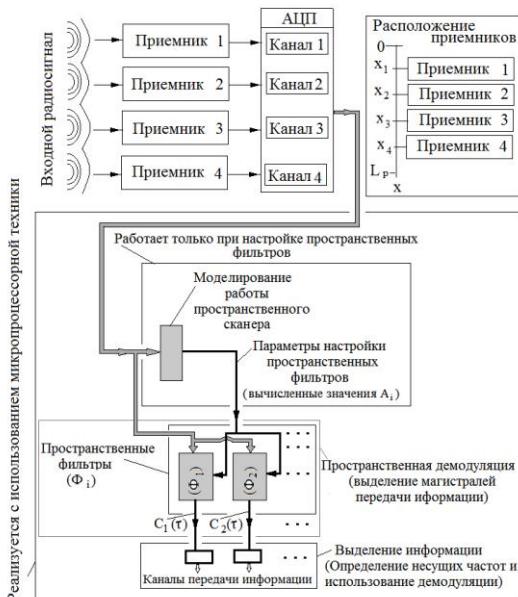


Рис. 2. Структурная схема приемной части

Подключения аналогового сигнала к АЦП может выполняться по однофазной или по дифференциальной схеме, как показано на рис. 3

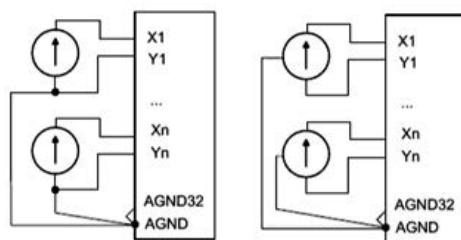


Рис. 3. Однофазная и дифференциальная схемы включения сигналов

Источники сигнала подключались по однофазной схеме в режиме с «общей» землей».

b) Дискретные аналоги распределенной функции $U^*(x,t)$ ($U^*(x_j,t), j=1..4$) пространственного сканера и пространственных фильтров (функция $U^*(x,t)=U(x,t)+\text{помеха}$). (Теоретические вопросы построения распределенных фильтров и пространственных сканеров рассмотрены в [1-4]).

Приведем основные результаты, полученные для одномерного распределенного фильтра. Математическая модель рассматриваемого фильтра записывается в виде:

$$A \cdot \frac{\partial^2 T(x,z,\tau)}{\partial x^2} + T(x,z,\tau) + \frac{\partial^2 T(x,z,\tau)}{\partial z^2} = 0, \\ 0 < z < Z_L, \quad 0 < x < X_L. \quad (1)$$

Состояние фазовой переменной на границе описывается уравнениями:

$$T(x=0, z, \tau) = T(x=X_L, z, \tau) = 0, \quad 0 < z < Z_L; \\ \frac{\partial T(x, z=Z_L, \tau)}{\partial z} = U(x, \tau), \quad 0 < x < X_L; \\ \frac{\partial T(x, z=0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad 0 < x < X_L; \quad 0 < x < X_p. \quad (2)$$

где A – коэффициент; x, z – пространственные координаты; τ – время; $T(x, z, \tau)$ – фазовая переменная ($T(x, z^*, \tau)$ – функция выхода (z^* – фиксированное значение координаты z ($0 < z^* < Z_L$)); X_p, Z_L – заданные величины, $U(x, \tau)$ – входное воздействие.

Коэффициент передачи, с использованием обобщенной координаты G [2], имеет вид:

$$K(G) = \frac{e^{\beta(G) \cdot z^*} + e^{-\beta(G) \cdot z^*}}{\beta(G) \cdot (e^{\beta(G) \cdot Z_L} - e^{-\beta(G) \cdot Z_L})}, \\ \beta(G) = (A \cdot G - 1)^{1/2}.$$

Положим, что значение параметра A изменяется в пределах от $1/G_1$ до нуля. Для значений:

$A=1/G_i$, ($G_i=\Psi^2, i=1, \infty$), $\beta(G_i) \rightarrow 0$, а значение $\text{abs}(K(G_i)) \rightarrow \infty$.

Запишем дискретную модель уравнения (1), (2) в матричном виде:

$$D \cdot X = U \rightarrow X = D^{-1} \cdot U,$$

$$\text{где: } D = \begin{bmatrix} * & D_1 & 0 & \cdots & 0 \\ D_1 & D_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & D_2 & D_1 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & D_2 & D_1 & D_2 \\ 0 & \cdots & 0 & D_2 & \bar{D}_1 \end{bmatrix}_{(n \times n)}, \quad X = \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix},$$

$$U = -1/\Delta z \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}, \quad D_2 = \frac{A}{\Delta x^2}, \quad D_1 = (1 - \frac{2 \cdot A}{\Delta x^2}),$$

$$D_1^* = (1 - \frac{2 \cdot A}{\Delta x^2} + C_1^*), \quad \bar{D}_1 = (1 - \frac{2 \cdot A}{\Delta x^2} + C_2^*),$$

C_1^* и C_2^* определяются с учетом граничных условий (в рассматриваемом случае они равны нулю). Если определитель матрицы $D \rightarrow 0$, то $K(G) \rightarrow$ к плюс, минус ∞ [1, 4]. Используя дискретную модель пространственного сканера, и изменяя значение параметра A от $1/G_1$ до нуля, определим значения $A = A_i$, в которых $\det(D)$ равен нулю. По вычисленным значениям A_i можем определить пространственные моды, из которых сформирован сигнал $U(x, t)$. Для выделения (i -ой) пространственной моды используется распределенный фильтр Φ_i (матрицу D^{-1} , построенную для выделения i магистрали (пространственной моды)). Полученный распределенный фильтр осуществляет пространственную демодуляцию входного сигнала (выделяя i -ю магистраль передачи информации $C_i(t)$ [1, 4]).

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} -78272.8435 & -126647.2873 & -126646.9883 & -78272.0607 \\ -126647.2873 & -204919.8318 & -204919.3481 & -126646.9883 \\ -126646.9883 & -204919.3481 & -204919.8318 & -126647.2873 \\ -78272.0607 & -126646.9883 & -126647.2873 & -78272.8435 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} -9590.9972 & 15520.5339 & -15521.2419 & 9592.8508 \\ 15520.5339 & -25112.2391 & 25113.3847 & -15521.2419 \\ -15521.2419 & 25113.3847 & -25112.2391 & 15520.5339 \\ 9592.8508 & -15521.2419 & 15520.5339 & -9590.9972 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} 375401.6623 & -607411.7714 & 607411.4568 & -375400.8385 \\ -607411.7714 & 982813.1190 & -982812.6099 & 607411.4568 \\ 607411.4568 & -982812.6099 & 982813.1190 & -607411.7714 \\ -375400.8385 & 607411.4568 & -607411.7714 & 375401.6623 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_4 = \begin{bmatrix} -233051.0147 & 377084.9565 & -377085.1335 & 233051.4781 \\ 377084.9565 & -610136.1482 & 610136.4346 & -377085.1335 \\ -377085.1335 & 610136.4346 & -610136.1482 & 377084.9565 \\ 233051.4781 & -377085.1335 & 377084.9565 & -233051.0147 \end{bmatrix}$$

Рис. 4. Численные значения пространственных фильтров

На рис. 4. Приведены численные значения пространственных фильтров, используемых в рассматриваемой установке. На рис. 5 приведены $C_i(t)$, используемые для тестирования приемной части установки.

На рис. 6 приведены графики восстановленных функций.

Как показывают графики рис. 5, 6, рассмотренная система достаточно хорошо выделяет информацию из распределенных входных воздействий.

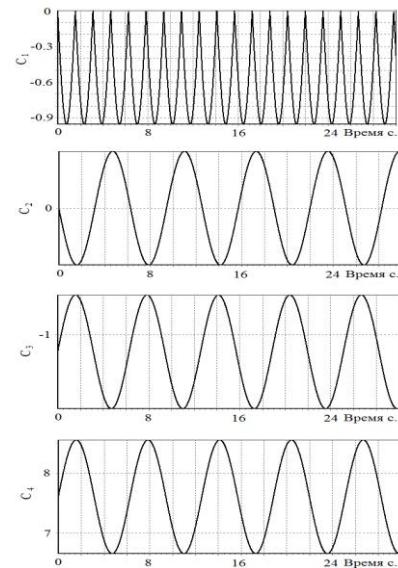


Рис. 5. Графики функций, используемых для тестирования

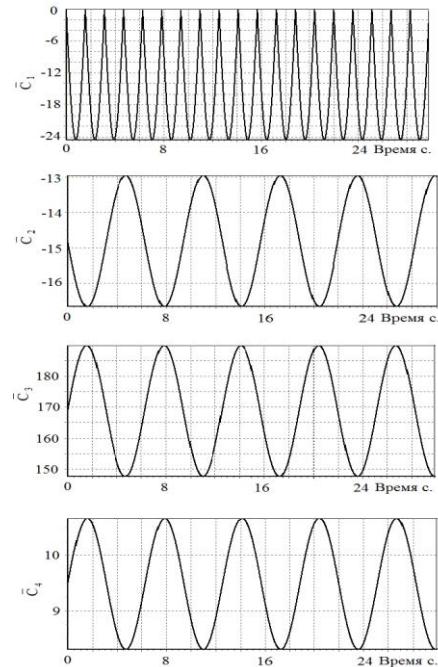


Рис. 6. Графики восстановленных функций

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализсинтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.
- Pershin I.M., Liashenko A.L., Papush E.G. General Principles for Designing Distributed ControlSystems. Authorized licensed use limited to: North-Caucasus Federal University. Downloaded on October 12, 2020 at 06:53:40 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply Accession Number: 19734647. DOI: 10.1109/WCONFC48837.2020.9131485978-1-7281-4944-8/20/\$31.00 ©2020 IEEE.
- Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Системы передачи и обработки распределенной информации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 5 (166). – С. 198-211.
- Першин И.М. Распределенные системы обработки информации. – Изд-во РИА-КМВ, 2008. – 148 с.
- Санкин А.В. Снижение уровня помех интерфейса в компьютерных системах управления. Управление и информационные технологии // 2-я Всероссийская научная конференция 21-24 сентября 2004 г. Т. 2. – Пятигорск: «Спецпечать», 2004. – С. 53-59.

Научное издание

Сборник научных трудов

**X Всероссийская
научная конференция**

«СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА»

Подписано в печать 27.09.2021 г.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Формат 60×84 1/8.

Усл. печ. лист. 31,7. Уч. изд. л. 25,7. Заказ

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции

Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Ставки, 200/1, тел (863) 243-41-66.