



VIII Всероссийская научная конференция Системный синтез и прикладная синергетика

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

18 - 20 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

п. Нижний Архыз

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южный федеральный университет
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук
Северо-Кавказский федеральный университет



VIII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»

сборник научных работ

п. Нижний Архыз, Россия
18–20 сентября 2017 г.

УДК 681.51.033(06)

ББК 32.965

C408

Программный комитет

Ю.Ю. Балега – почетный сопредседатель, Специальная астрофизическая обсерватория РАН
А.А. Колесников – почетный сопредседатель, Южный федеральный университет
Г.Е. Веселов – сопредседатель, Южный федеральный университет
В.В. Власюк – сопредседатель, Специальная астрофизическая обсерватория РАН
И.М. Першин – сопредседатель, Северо-Кавказский федеральный университет
В.Л. Заковоротный, Донской государственный технический университет
С.Е. Душин, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
Д.А. Первухин, Санкт-Петербургский горный университет
Э.Я. Рапопорт, Самарский государственный технический университет
А.Н. Попов, Южный федеральный университет
А.Н. Самойлов, Южный федеральный университет
А.Б. Чернышев, Северо-Кавказский федеральный университет
О.П. Желенкова, Специальная астрофизическая обсерватория РАН
А.А. Лежебоков, Южный федеральный университет
В.А. Уткин, Институт проблем управления РАН

C408 **VIII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»**: сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 444 с.

ISBN 978-5-9275-2497-6

Сборник состоит из трудов VIII-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (CCPS-2017), посвященной рассмотрению новой нелинейной проблемы системного синтеза, опирающейся на синергетические законы единства процессов самоорганизации и управления, что позволяет впервые решить крупные прикладные задачи управления в таких важных областях, как нелинейные многомерные механические, электромеханические и энергетические системы, охватывающие значительную часть современной технологической деятельности.

Сборник трудов адресуется специалистам, преподавателям университетов и аспирантам, интересующимся междисциплинарными нелинейными проблемами прикладной синергетики, системного синтеза и науки управления.

УДК 681.51.033(06)

ББК 32.965

ISBN 978-5-9275-2497-6

© Южный федеральный университет, 2017

Оглавление

Колесников А.А.	
Синерго-кибернетическая парадигма в современной науке	7
I. ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ 18	
Болтунов Г.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Мансурова О. К., Першин И.М.	
Качественный синтез полиномиальных законов управления для динамических объектов.....	18
Веселов Г.Е.	
Теория иерархического управления сложными системами: синергетический подход....	23
Калий Д.С., Радионов И.А.	
Синергетическая система управления гибридной силовой установкой	44
Кузьменко А.А.	
Синергетическое управление нелинейными техническими системами: интегральная адаптация высокого порядка	50
Межаков О.Г.	
Понижающий неизолированный импульсный преобразователь напряжения под управлением синергетического регулятора	61
Мельников В.П.	
Информациология взаимодействий и синергетика оружейных технологий.....	70
Олейников К.А., Катилевская И.Ю.	
Синергетическая система управления балансирующим роботом	80
Попов А.Н.	
Синергетический синтез следящих регуляторов	90
Романов С.А.	
Критерии слабой аттрактивности неустойчивого положения равновесия	97
Скляров А.А., Похилина Т.Е.	
Синергетический синтез закона управления мобильным роботом на колесах Илона ...	103
Смаргунова А.С., Скляров А.А.	
Синергетическое управление системой стабилизации камеры в условиях постоянно действующих внешних возмущений	111
Якименко О.И., Радионов И.А.	
Синергетический синтез нелинейных адаптивных законов управления пространственным движением автономного подводного аппарата	123
II. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ 129	
Афанасьева И.В.	
Разработка программ управления астрономическими ПЗС-системами.....	129
Гумеров А.Р.	
Разработка web-приложения для анализа радиоспектрографических данных РАТАН-600	134

Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А., Малькова Г.А., Шушура А.А., Шергин В.С., Черненков В.Н.	
Управление экспериментальными данными в контексте долговременного хранения цифровой информации.....	143
Комаров В.В.	
Параметрический синтез наблюдательных систем	150
Панчук В.Е., Верич Ю.Б., Емельянов Э.Б., Клочкова В.Г., Согоян А.Г., Шергин В.С., Юшкин М.В., Якопов Г.В.	
Спектроскопия звезд: проблемы эксперимента и обработки информации	157
Эверстов Н.П., Богод В.М., Курочкин Е.А.	
Многоканальная регистрация наблюдений солнца на радиоспектрографе РАТАН-600	162
Эркенов А.К., Сотникова Ю.В.	
Автоматизация обработки наблюдательных данных радиотелескопа РАТАН-600, представление результатов	172
Юшкин М.В., Панчук В.Е., Фатхуллин Т.А., Верич Ю.Б., Якопов Г.В.	
Использование методов математического моделирования в наземных и орбитальных астрофизических экспериментах.....	179

III. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Айазов Ю.Г., Абилова К.Б.

Исследование платежного процесса в работе мобильного банкинга на основе вероятностного метода	187
---	-----

Антонов В.Ф., Мамедов Р.А.

Устранение дефицита канала клиента провайдера в момент распределенной атаки на отказ в обслуживании.....	194
--	-----

Банокин П.И., Цапко Г.П.

Ранняя идентификация внутренних утечек данных на основе анализа поведения пользователей	199
---	-----

Басан А.С., Басан Е.С.

Модель угроз для систем группового управления мобильными роботами	205
---	-----

Веселова Д.Г.

Разработка системы мониторинга проектов с использованием мультиагентных технологий для виртуальных компаний	213
---	-----

Колесникова С.И.

Конструирование системы множественного управления плохо формализуемыми объектами.....	223
---	-----

Кумов А.М., Кумова Д.М.

Проектирование системы машинного зрения для организации выборов на избирательном участке.....	229
---	-----

Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р.

О решении некоторых задач, возникающих при моделировании взаимодействия социальных групп	240
--	-----

IV. УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ...	250
Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Сердитов Ю.Н.	
Программный модуль для исследования нелинейных теплообменных процессов в ректификационных колоннах насадочного типа	250
Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Сирота Д.Д.	
Волоконно-оптические системы измерения в нефтегазовой промышленности	256
Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Федоров М.С.	
Состояние и перспективы развития автоматизации и управления комплексной подготовкой природного газа на месторождениях Крайнего Севера	264
Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Черкасова В.А.	
Исследование процессов теплообмена в блоке огневой регенерации диэтиленгликоля	273
Брикова О.И., Грудяева Е.К., Душин С.Е.	
Анализ влияния внешних факторов на управляемые процессы биологической очистки сточных вод	280
Зайцев С.В., Жерносек И.А.	
Идентификация и синтез регулятора для многомерного объекта с использованием модальных воздействий	292
Ильюшин Ю.В., Первухин Д.А., Калугин С.П., Сенчило Н.Д., Коржавина Н.А.	
Методы и алгоритмы модернизации производства артиллерийских орудий с целью повышения их боевой эффективности	298
Кленов К.В., Львов А.А., Львов П.А., Кузин С.А., Светлов М.С.	
Распределенная система датчиков для управления на основе беспроводного радиоканала связи	306
Кленов Д.В., Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Светлова М.К.	
Информационный канал повышенной помехоустойчивости в распределенных беспроводных бортовых системах	314
Кленов Д.В., Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Светлова М.К.	
Математическая модель информационного канала с кодеком на базе кодового сигнального признака	322
Кухарова Т.В., Уткин В.А.	
Факторный анализ параметров накожной электропроводности у пациентов с психическими расстройствами различного генеза	331
Ляшенко А.Л.	
Система управления тепловыми полями теплоносителя в технологических каналах атомного реактора	337
Макаров А.М., Мулкиджанян П.П., Постовалов С.С.	
Управление распределенными интегрированными системами охраны важных объектов	346
Першин И.М., Малков А.В., Помеляйко И.С.	
Существующие проблемы управления гидролитосферными процессами в курортных регионах и пути их решения	351

Першин И.М., Папуш Е.Г.	
Управление процессом контактного взаимодействия пищевой массы с рабочей поверхностью формующей машины.....	359
Пшеничкина В.А., Щитов Д.В., Сидякин П.А.	
Обеспечение долговечности зданий исторической застройки курортного региона кавказские минеральные воды.....	371
Рапопорт Э.Я., Плещивцева Ю.Э.	
Векторные задачи оптимального управления системами с распределенными параметрами	376
Санкин А.В., Алтухов В.И.	
Технология получения совершенных монокристаллов карбида кремния методом синергетически управляемого высокотемпературного индукционного нагрева	385
Уткин В.А., Першин И.М., Головкин С.И., Кухарова Т.В., Папуш Е.Г.	
Особенности идентификации динамики метаболизма в живой системе исходя из канонов медицинских классификаций.....	391

IV. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Вартумян А.А., Клименко И.С.	
Экспериментальное исследование процесса личностно-ориентированного обучения в системе высшего профессионального образования	397
Горбатюк В.Ф.	
Обучение систем естественного интеллекта.....	409
Горбунов А.В., Лызь А.Е., Борисова Е.А.	
Планирование результатов обучения по инженерным образовательным программам в соответствии с концепцией CDIO	419
Котова Е.Е., Потапова В.Э.	
Управление структурированием электронного учебного ресурса в среде LMS Moodle	428
Лабынцева И.С., Познина Н.А.	
К проблеме подготовки научных инженерных кадров	435
Лызь Н.А., Лызь А.Е.	
Переход к новым моделям образования в подготовке инженеров	440

Колесников Анатолий Аркадьевич

Южный федеральный университет

СИНЕРГО-КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА В СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ

Аннотация. В результате многолетних исследований обоснована и развита новая целостная концепция единства процессов самоорганизации и управления – КЕПСУ в динамике сложных нелинейных систем, имеющая глубокие мировоззренческие и философские связи с ключевыми принципами развития науки – принципами порождения, связности и целеполагания. В основе КЕПСУ лежит универсальный всепроникающий инвариант самоподобия процессов самоорганизации в природе. В данном обзоре приводятся некоторые размышления о сущности КЕПСУ, ее научной, прикладной и, возможно, ее общей мировоззренческой роли, отражающей синерго-кибернетическую парадигму в современной науке.

Ключевые слова: кибернетика, синергетика, синергетическая теория управления, самоорганизация, метод АКАР, нелинейная динамика, системный синтез, системный анализ.

Annotation. As a result of many years of research, we justified and developed a new holistic concept of the unity of the processes of self-organization and control – CUPSOC in the dynamics of complex nonlinear systems, which has deep philosophical and philosophical connections with the key principles of the development of science, i.e. the principles of generation, connectivity and goal-setting. At the heart of CUPSOC is the universal all-pervasive invariant of the self-similarity of the processes of self-organization in the nature. In this review, some reflections on the essence of CUPSOC, its scientific, applied and, perhaps, its common worldview role reflecting the synergistic cybernetic paradigm in modern science are explored.

Keywords: cybernetics, synergetics, synergetic control theory, self-organization, ADAR method, nonlinear dynamics, system synthesis, system analysis.

«Все в одном, и одно во всем.»
Дао-дэ Цзин

Кибернетике и синергетике. К выдающимся достижениям науки XX в. несомненно относятся такие интенсивно развивающиеся направления, как кибернетика и синергетика, вызвавшие острые и длительные дискуссии.

Кибернетика, как определил ее основоположник Норберт Винер, – это учение об «управлении и связи в животном и машине», а синергетика, как утверждает ее создатель Герман Хакен, – это учение о взаимодействиях в сложных самоорганизующихся динамических системах. Отсюда следует, что как кибернетика, так и синергетика, – это науки о процессах управления и взаимодействия в динамических системах любой природы. Хотя термины «кибернетика» и «синергетика» появились в научном лексиконе только в XX в., на самом деле – это довольно древние науки, которые столь долго не проявляли себя в силу того, что основное внимание человечество долгие столетия уделяло, в первую очередь, геометрии и алгебре, т.е. наукам о статических состояниях. Иначе говоря, долгие столетия «динамика была скрыта под толстым слоем статики». Недаром же древний мир называют миром геометрии, Средневековые – миром золотой пропорции, а XX и XXI вв. – миром ритма и динамики.

Согласно современной научной парадигме, в природе всюду и всегда существуют движение и преобразование движущейся материи, а вечно сохраняющаяся энергия является их количественной мерой. Современная наука утверждает, что окружающая нас и объективно существующая действительность, в том числе и Космос, представляют собой единую динамическую взаимодействующую суперсистему, в которой могут возникать сложные бифуркационные и хаотические процессы. Взаимодействия, в первую очередь гравитационное и электромагнитное, между объектами этой суперсистемы являются универсальным свойством

природы. Оно связано с переносом вещества и энергии и сопровождается процессами диссипативной или консервативной самоорганизации. Известно, что сущность классической механики и вообще физики определяется, в первую очередь, содержанием тех «законов природы», которые описывают соответствующую предметную область. История науки показывает, что эти законы практически всегда являлись результатом догадки, прозрения и везения великих ученых. Возникает идея о своего рода синерго-кибернетической генерации такого рода системных законов, т.е. поиска объективных закономерностей *единства процессов самоорганизации и управления – нелинейного взаимодействия*. Разумеется, что такая постановка научной проблемы в определенной мере не традиционна, однако даже первые успешные шаги в этом направлении позволили бы указать перспективный путь развития системной физики и, следовательно, выявления общесистемных естественных закономерностей различной природы. В основу решения этой суперпроблемы современной науки следует, на наш взгляд, положить порождающий *природный принцип самоподобия процессов самоорганизации* систем. Из синергетики известно, что именно процесс самоорганизации является универсальным *инвариантом* в эволюции диссипативных систем любой природы. При этом *самоподобие процессов самоорганизации* отражает идентичность динамики развития соответствующих систем. Еще И. Ньютон говорил, что «природа проста и не роскошествует излишними причинами». В связи с этим имеются определенные основания утверждать, что экономия природы проявляется именно в ключевом *принципе самоподобия процессов самоорганизации*, который пронизывает все уровни природы.

Очевидно, что именно этот всепроникающий природный принцип и следует положить в основу новой науки, которую можно первоначально назвать системной физикой – наукой о процессах и законах гармоничного взаимодействия в системах произвольной природы. Именно в альянсе кибернетики и синергетики, на наш взгляд, и заложены перспективы развития этой новой науки.

Вообще говоря, кибернетика и синергетика – это науки о внешне во многом скрытых (латентных) процессах, которые проявляются в основном в переходных процессах. Как писал Н. Моисеев, «развитие любой динамической системы происходит в окрестности некоторого аттрактора». Здесь термин «развитие» отражает кибернетическую сущность системы, а термин «аттрактор» – синергетическое содержание любой системы. Отсюда следует, что именно в концептуальном альянсе кибернетики и синергетики, на наш взгляд, наиболее ярко проявляется динамическое единство мира, которое отражается в целостной системообразующей *концепции единства процессов самоорганизации и управления* (КЕПСУ). Знаменитое изречение из Дао-де Цзин: «Все в одном, и одно во всем!» выражает суть этой фундаментальной концепции. Здесь также уместно привести следующее утверждение ученых Санкт-Петербургского госуниверситета: «... всякий процесс в Мироздании может быть интерпретирован в качестве *процесса управления или самоуправления*. По этой причине понятийный и терминологический аппарат именно теории управления как таковой является обобщающим, что позволяет с его помощью *единообразно описывать* разные процессы: *общеприродные, биологические, технические...*». Если термину «самоуправление» придать смысл понятия «самоорганизации», то это утверждение также отражает суть КЕПСУ. В наших исследованиях указанная концепция рассматривается с разных точек зрения – от процессов в искусственных системах разной природы до процессов гравитационного взаимодействия тел. Имеются основания утверждать, что КЕПСУ имеет непосредственное отношение к эволюционным процессам в природе.

Кибернетика и синергетика естественным образом дополняют друг друга, т.е. находятся в гармоничном дуальном соотношении. Это свойство и отражается в КЕПСУ. Разумеется, что указанная дуальность проявляется, в первую очередь, в естественных системах разной природы – биологической, гравитационной, электромагнитной и др. Оказывается, что мерой такой дуальной гармонии часто выступает «золотая пропорция». Этот удивительный факт еще не нашел своего научного обоснования. Возможно, что известные в науке различные постоянные «законов природы» и являются мерой указанной дуальности. По-видимому, такое утверждение требует более глубокого обоснования.

Что же касается искусственных систем – технических, экологических, социально-экономических и др., то гармоничная дуальность этих систем в КЕПСУ связана с целью, внешне «навязываемой» соответствующей системе. В синергетике такая мера гармонии выражается в форме соответствующего «управляющего параметра». Выбор такого параметра – это важная самостоятельная задача той или иной прикладной науки.

Итак, кибернетическое и синергетическое начала должны находиться в гармоничном единстве, т.е. между ними имеется неантагонистическое противоречие, обеспечивающее высокие потенциальные возможности соответствующей системы. В сложных самоорганизующихся системах это проявляется в *принципе взаимодействия* между элементами общей системы для достижения поставленных перед ней целей.

Пользуясь терминологией И. Пригожина, альянс кибернетики и синергетики можно интерпретировать как «новый диалог человека управляющего с природой». Дело в том, что искусственные системы – это фактически всегда управляемые системы, т.е. в этих системах всегда в той или иной мере присутствует кибернетическое начало, мера которого зависит от целей, внешне поставленных перед системой. И чем больше потенциал развития системы, тем больше роль кибернетического начала в свойствах этой системы. Разумеется, что эта мера не должна быть подавляющей. На этапе возникновения, т.е. развития системы, доминирует кибернетическое, а на этапе существования – синергетическое начало. Все искусственные управляемые системы имеют свою цель, которая отражает кибернетическое начало. В результате возникает новое свойство системы – «эмержентность», что, в свою очередь, и отражает синергетическое начало. Именно достижение гармоничного единства этих дуальных начал и является основной задачей как при анализе естественных систем, так и синтезе современных искусственных систем.

Как кибернетика, так и синергетика, в процессе своего становления и развития подвергались острой критике со стороны ряда ученых, философов и журналистов. Кратко коснемся и мы этой критики, тем более, что дискуссия о сущности и значимости кибернетики и синергетики все еще продолжается. В своей удивительной книге «Конец науки» (СПб.: Альфа/Эврика, 2001) известный американский ученый и писатель Джон Хорган пишет, что еще в XVII в. великий Лейбниц пытался создать универсальную логическую систему, которая могла бы решить любые вопросы: математические, философские, моральные и социально-политические. На протяжении нескольких веков мечта Лейбница живет в умах ученых. В XX в. они пытались реализовать эту мечту в таких теориях, как кибернетика, теория информации, теория катастроф и др. Приведем яркое высказывание Д. Хоргана в отношении кибернетической теории: «Кибернетика в основном была создана одним человеком, Норбертом Винером, математиком из Массачусетского технологического института. Подзаголовок его книги 1948 г. «Кибернетика» (*Cybernetics*) открывал его амбиции: «Управление и связь в живом организме и машине». Винер основал этот неологизм на греческом термине *kybernetes*. Он заявил, что можно создать одну, всеохватывающую теорию, которая объяснила бы работу не только машин, но и всех биологических явлений, от одноклеточных организмов до национальной экономики. Все эти сущности обрабатывают информацию и действуют в соответствии с информацией; все они используют такие механизмы, как положительная или отрицательная обратная связь и фильтры для отличия сигналов от шума. К 1960-м гг. кибернетика потеряла свой блеск. Выдающийся инженер-электрик Джон Р. Пирс в 1961 г. отметил, что «в этом столетии мир кибернетики был использован наиболее обширно в прессе, в популярных и околосоветских, если не полуграмотных, журналах». Кибернетика все еще имеет последователей на изолированных территориях, например в России, которая в советскую эпоху была очень восприимчива к фантазиям об обществе как о машине, которая может быть точно настроена, если следовать указаниям кибернетики.

В приведенной критике кибернетики Д. Моргана, связанной с попытками ряда ученых, в первую очередь гуманитариев, придать кибернетике чрезмерно общий характер, немало правды. Однако, что касается естественных наук, то понимание истинной значимости кибернетических идей в этих науках, на наш взгляд, еще не достигло должного уровня. В классической науке фактически отсутствуют какие-либо признаки кибернетической идеологии. И в этом смысле истинное понимание кибернетики еще ждет своего обоснования. На наш взгляд, такое понимание с

наибольшей глубиной может быть достигнуто на основе *синерго-кибернетической парадигмы* и следующей из нее целостной КЕПСУ. Эта системообразующая концепция, опирающаяся на фундаментальные принципы *порождения, связности и целеполагания*, позволяет гармонично соединить разрозненные, на первый взгляд, понятия ряда современных наук в некую единую картину и тем самым в какой-то мере коснуться удивительной мечты великого Лейбница. Разумеется, что подобное утверждение может вызвать несогласие и дискуссию, которая всегда была двигателем прогресса в науке.

Кибернетика в нашей стране – СССР и России – прошла драматический путь – от «продажной девки капитализма», как это писали советские философы в 50-х гг. XX в., до светоча на пути к коммунизму и до якобы частного случая так называемых «фундаментальных наук». Так, например, в настоящее время термин «кибернетика» отсутствует как в обширном перечне отделений РАН, так и в названиях и рубриках академических журналов. В настоящее время в РАН имеется Отделение с названием «Энергетика, машиностроение, механика и процессы управления». Как будто бы процессы управления характерны лишь для энергетических и механических систем, а не для динамических систем любой природы – физико-технической, химической, биологической, экологической, социально-экономической и др. Причем это Отделение возглавляли обычно ученые, имеющие отдаленное отношение к кибернетике – науке о процессах управления. Аналогичная ситуация длительное время наблюдается и в академических журналах. Так, проблемы кибернетики в той или иной мере находят отражение лишь в двух известных журналах: «Автоматика и телемеханика» (АиТ) и «Теория и системы управления» (ТиСУ). Ранее, в советское время, журнал ТиСУ назывался «Техническая кибернетика» (ТК) и освещал, в первую очередь, решение прикладных проблем кибернетики в технических системах. Представляется достаточно очевидным, что в дополнение к указанным журналам целесообразно издавать также журналы «Прикладная кибернетика» и «Прикладная синергетика», например, в виде «Известия вузов». Изложенное выше означает, что кибернетика и тем более синергетика все еще не находятся на переднем рубеже российской академической науки. Справедливо ради, следует отметить, что решением РАН в нашей стране обычно «назначается» и финансируется 5-6 так называемых «ведущих научных школ» в области теории и систем управления. Такие школы, за редким исключением (например, ИПУ РАН), мало влияют на общую идеологию и научную среду в области теории и практики управления. Существенно более благоприятно положение с кибернетикой и синергетикой в университетах России, где без какого-либо финансирования успешно функционируют истинные научные школы, например, в области нелинейного системного синтеза (ЮФУ) и адаптивного управления (СПбГЭТУ) и др.

Прошло 50 лет со времени проведения в 1960 г. в СССР Первого конгресса ИФАК – международного конгресса по автоматическому управлению. С одной стороны, проведение в СССР этого авторитетнейшего собрания ученых означало признание со стороны мировой общественности выдающихся достижений советских ученых в области теории управления, а с другой, – огромную политическую значимость, которой придавало Правительство СССР этой теории и кибернетике в целом, для достижения поставленных перед советским обществом целей. Руководил конгрессом А.М. Летов – видный ученый, основоположник знаменитой теории АКОР – аналитического конструирования оптимальных регуляторов. Руководители конгресса были приняты в Кремле, что подчеркивало ключевую значимость кибернетики, которую придавало ей Советское Правительство. Следующим ярким подтверждением выдающихся успехов советской науки было проведение XI Конгресса ИФАК в г. Таллине в 1990 г. К этому времени СССР уже был расшатан. К сожалению, с тех пор, когда СССР распался, значимость и роль кибернетики – науки о процессах управления – в России резко упали. Правда, в последние годы российская научная общественность пытается возродить былую значимость кибернетики, в том числе проводя в Санкт-Петербурге каждые два года объединенную мультиконференцию по проблемам управления. Однако, учитывая нынешнее положение академической и вузовской науки и отношение к ней российского общества, осуществить такое возрождение представляется весьма проблематичным. Если же этого не произойдет, то нас ждет очередной упадок в развитии страны.

Более оптимистичным является положение кибернетики в университетской науке России. Так, еще в 1935 г. в «ЛЭТИ» (ныне Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете) была образована первая вузовская кафедра автоматики и телемеханики – ныне кафедра автоматики и процессов управления, сыгравшая выдающуюся роль в развитии кибернетики и образования подобных кафедр и научных школ в разных городах СССР и России. В перечне направлений и специализаций по схеме «бакалавр – магистр», на которую перешло российское высшее образование, кибернетика нашла свое отражение в ряде направлений – от «Системный анализ и управление» до «Техническая физика». Это внушает определенный оптимизм, связанный с перспективами подготовки новой генерации российских специалистов в области универсальной науки о процессах самоорганизации и управления в сложных системах разной природы.

Теперь еще несколько слов о синергетике – новой науке о процессах взаимодействия в сложных самоорганизующихся системах любой природы. Сам термин «синергетика» – это, говоря на современном сленге, своего рода новый научный «брэнд», истоки которого, как и кибернетики, лежат в глубоких недрах науки. Термин «синергетика» в науку более 30 лет назад ввел немецкий физик Герман Хакен. Этот термин получил распространение в Германии и России. В других странах эту новую науку называют «наукой о сложном», «нелинейной наукой», «хаосодинамикой» и др. Основной вопрос синергетики, поставленный Г. Хакеном, таков: «Существуют ли в природе законы самоорганизации сложных систем и каковы эти законы?» Этот же вопрос ставил и давал утвердительный ответ на него другой выдающийся ученый Илья Пригожин, который так и назвал одну из своих знаменитых книг: «От существующего к возникающему» (М.: Наука, 1985). На этот же вопрос затем пытались дать ответ и другие видные ученые – Н. Моисеев, С. Курдюмов, Е. Князева, В. Эбилинг, К. Майницер, Г. Малинецкий, Д. Чернавский, Э. Сороко, А. Назаретян, В. Романов и др., известные своими работами в области философии, социологии и естествознания. В целом, поставленный Г. Хакеном и И. Пригожиным ключевой вопрос о законах самоорганизации сложных систем вызвал у ряда ученых сомнение в полноте базовых постулатов классической науки. Эта наука, как писал Г. Хакен, «долгое время была занята лишь вопросами *строения – но не возникновения!* – *структур*, существующих вокруг нас. ...Наука должна объяснить природу самозарождения и развития структур – иными словами, суть процессов самоорганизации». Разумеется, что подобного рода утверждения иногда вызывают активный протест и несогласие у многих adeptov классической науки, полагающих, что широко известные так называемые «законы природы» обладают исчерпывающей полнотой и, следовательно, окончательны и неизменны. Однако, как утверждает синергетика – наука о самоорганизации сложных систем, это далеко не так, что и вызвало бурную и длительную дискуссию в научном сообществе. При этом весьма интересно, что ряд физиков относятся со скепсисом и явным недоверием к синергетике, а некоторые из них – даже называют ее «ложенаукой». Российские же философы и социологи, по-видимому утомленные жесткими рамками коммунистической идеологии своих наук, с большим энтузиазмом встретили появление синергетики и вдруг оказалось, что они уже давно мыслят базовыми положениями этой новой науки и даже сделали большой «вклад» в ее развитие. Подавляющее большинство современных гуманитарных журналов уделяет значительное внимание синергетической тематике. Разумеется, что это вызывает определенную ironию у многих физиков и математиков. «Технари» же в основном стоят в стороне и со скепсисом наблюдают за этой дискуссией.

В целом, на наш взгляд, принципиально новые перспективы развития науки и особенно современных технологий связаны, в первую очередь, с естественным концептуальным альянсом кибернетики и синергетики. Эти два ключевых направления современной науки имеют глубинные внутрисистемные связи. Так, еще Н. Винер в своих «Новых главах кибернетики», опубликованных в 1961 г., впервые рассмотрел важные вопросы, связанные с созданием самовоспроизводящихся машин, а также самоорганизующихся систем. При этом он указывал на особую «важность нелинейных обратных связей в возникновении обоих процессов». Указывая на принципиальную значимость явлений самоорганизации в сложных системах, Н. Винер в качестве важного прикладного примера приводил следующую задачу управления группой электрических генераторов: «Представим себе ряд генераторов переменного тока, частоты которых регулируются регуляторами, прианными первичным двигателем. Эти регуляторы удерживают частоты в

сравнительно узких полосах. ...Чтобы избежать проблем, какие возникали на электростанциях прежнего типа в связи с участием человека в коммутации, предположим, что выходы генераторов присоединены параллельно к сборным шинам, а с них ток идет на внешнюю нагрузку, которая в общем случае будет подвержена более или менее случайным флюктуациям. Предположим, что включение и выключение генераторов происходит автоматически. Когда генератор доведен до скорости и фазы, достаточно близких к скорости и фазе других генераторов системы, автоматическое устройство подключает его к сборным шинам, а если случайно его частота и фаза отклоняются слишком далеко от надлежащих величин, то аналогичное устройство автоматически отключает его. В такой системе генератор, стремящийся вращаться слишком быстро и, следовательно, иметь слишком высокую частоту, берет большую долю нагрузки, чем полагается, а генератор, вращающийся слишком медленно, берет меньше своей нормальной доли. В результате частоты генераторов сближаются. Генерирующая система в целом действует как бы под управлением *скрытого регулятора*, более точного, чем регуляторы отдельных генераторов, и представляющего собой совокупность этих регуляторов вместе с *электрическим взаимодействием между ними...* Итак, мы видим, что нелинейное взаимодействие, создающее *притяжение частот*, может породить *самоорганизующуюся систему*. Иначе говоря, Н. Винер указывает на возможность возникновения процессов самоорганизации – явления «притяжения частот» за счет явления кооперативного нелинейного взаимодействия генераторов. Эффект «притяжения частот» может возникнуть в результате действия общего «скрытого регулятора», представляющего собой некоторую информационную совокупность регуляторов отдельных генераторов. Хотя эти идеи самоорганизации электромеханических процессов в генераторах через координирующее управление были сформулированы Н. Винером около 40 лет назад, они получили свое эффективное решение только в последнее время на основе КЕПСУ в работах нашей научной школы.

Итак, еще Н. Винером указывалось на глубинную и тесную связь между процессами управления и самоорганизации в сложных естественных и искусственных системах. Фактически впервые в науке Н. Винер указал на ключевую роль нелинейных обратных связей в формировании процессов самоорганизации в сложных динамических системах различной природы. Однако в кибернетике долгое время оставалась нерешенной фундаментальная проблема нелинейного системного синтеза – генерации совокупности нелинейных обратных связей, обеспечивающих устойчивое формирование направленной самоорганизации в многомерных динамических системах. Эта проблема получила эффективное решение в КЕПСУ в форме синергетической теории управления (СТУ) и основанного на ней метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Эта теория и метод нашли свое эффективное применение в различных областях техники и получили достаточно широкое международное и российское признание. Следует, однако, отметить, что СТУ и метод АКАР все еще нередко остаются своего рода *terra incognita* для ряда теоретиков из РАН и некоторых «престижных вузов». По-видимому, этот удивительный, хотя и нередко обычный в российской науке, факт можно объяснить диктатурой математического формализма, часто проповедуемой в этих учреждениях. Как иронично замечал А. Эйнштейн, в таких случаях неожиданно возникает кажущаяся «возможность овладеть предметом, не понимая существа дела». Отрадно, что прикладники и «технари», как правило, избавлены от подобного формализма. Разумеется, что и они не должны впадать в «разгул правдоподобия» при решении сложных проблем нелинейного системного синтеза.

Таким образом, еще Н. Винер подчеркивал удивительную способность нелинейных явлений придавать динамическим системам свойство самоорганизации. Однако снова необходимо подчеркнуть, что Н. Винер не создал теорию синтеза такой совокупности нелинейных обратных связей, которые формируют в пространстве состояний динамических систем такие структуры – аттракторы, на которых и возникают новые свойства – эмерджентность системы. При этом, говоря языком синергетики, на аттракторах снижается размерность пространства состояний системы, а ее движение на аттракторе описывается поведением так называемого «параметра порядка» – некоторой доминирующей переменной, которой «подчиняются» все остальные координаты системы. Переход изображающей точки самоорганизующейся системы на аттрактор определяется так называемым «управляющим параметром» и может носить бифуркационный характер. *Принцип*

подчинения, атTRACTоры, параметры порядка, управляющие параметры и бифуркации – это базовый лексикон синергетики – науки о процессах самоорганизации в сложных нелинейных динамических системах. Автором синергетики является Г. Хакен, который вслед за Н. Винером развил теорию самоорганизации сложных систем. Это выдающееся достижение в науке, своего рода поворотный момент в ее развитии. Однако, справедливости ради, следует указать на то важное обстоятельство, что синергетика Г. Хакена – это, в первую очередь, теория анализа нелинейных динамических систем, обладающих поразительным свойством самоорганизации и вытекающими из этого удивительными особенностями таких систем. В целом, это – теория анализа сложных нелинейных систем, возникновение которой стало весьма неожиданным для многих даже видных ученых и, как следствие, вызвавшей многолетнюю дискуссию. Дело в том, что в силу неординарных свойств нелинейных динамических систем, главным из которых является несправедливость принципа суперпозиции, лежащего в основе теории линейных систем и, следовательно, большинства принципов и методов классической науки. Как писал выдающийся математик XX в. Джон фон Нейман, «нельзя построить содержательную общую теорию нелинейных систем». Он ошибался, и это показали работы научных школ Г. Хакена и И. Пригожина, развивших базовые положения новой теории самоорганизующихся систем. Ключевые понятия этой теории – атTRACTоры, бифуркации, динамический хаос, фракталы и др. – уже вошли в лексикон нелинейной науки XXI в. И снова подчеркнем, что эта новая наука основана на анализе сложных нелинейных динамических систем, опирающемся на указанные базовые понятия этой науки. В этой связи приведем утверждение М. Бранского «дни синтеза короче веков анализа». Из него следует, во-первых, что долгие века наука занимается анализом систем разной природы, вводя и обосновывая новые парадигмы. В конце XX в. и начале XXI в. – это парадигма синергетики, динамического хаоса и нелинейности. Эта неожиданная парадигма науки, претендующая на роль нового мировоззрения, вызвала бурную дискуссию в мировом и российском научном сообществе. И если на Западе и в США из нее уже пытаются извлечь прикладные результаты, организовав многочисленные центры, журналы и конференции и др., то в России все еще продолжают выражать сомнения в перспективах этой новой научной парадигмы. И, разумеется, как только на Западе извлекут из нее новые поразительные технологические выгоды, мы тут же полностью признаем ее, постараемся придать ей характер новой идеологии и т.д. Подобное у нас уже было с теорией относительности и кибернетикой. Особое раздражение указанная парадигма вызвала у ряда естественников, воспитанных на принципах и канонах классической науки. И этому во многом способствовали российские гуманитарии – философы, социологи и экономисты, которые радостно ухватились за новую науку – синергетику как за спасательный круг в бурном море современного мирового цивилизационного кризиса.

Опираясь на указанную мировоззренческую парадигму, следует, на наш взгляд, сформировать новую *синерго-кибернетическую доктрину*, которую следует положить в основу пути технологического и социально-экономического развития общества. Этую доктрину должен знать каждый студент, специалист и член правительства.

О синергетике и проблеме нелинейного системного синтеза. Теперь снова несколько подробнее коснемся сущности проблемы нелинейного системного синтеза, о которой уже шла выше наша речь.

На основе рассматриваемой КЕПСУ нами была создана принципиально новая теория и методы нелинейного системного синтеза в разных областях современной науки и техники. Развитая теория и методы, на наш взгляд, представляют собой существенно новый шаг по сравнению с идеологией системного анализа в работах научных школ Г. Хакена и И. Пригожина в области самоорганизации сложных динамических систем.

Базовые положения развитой нашей научной школой теории и основанные на ней новые методы нелинейного системного синтеза – аналитического конструирования объективных законов единства процессов самоорганизации и управления были заложены еще в начале 80-х гг. XX в. и независимо от работ научной школы Г. Хакена. «Макропеременные», «инвариантные многообразия», «целевые атTRACTоры», «динамическая декомпозиция» синтезируемых систем

являются ключевыми понятиями новой теории нелинейного системного синтеза, позволяющие осуществить направленную самоорганизацию синтезируемых систем. Указанные понятия оказались определенной аналогией «параметров порядка», «аттракторов» и «принципа подчинения», лежащих в основе синергетики Г. Хакена – теории стихийной самоорганизации, т.е. новой теории анализа сложных нелинейных динамических систем. Существенное отличие нашей синергетической теории нелинейного системного синтеза от синергетики Г. Хакена заключается в том, что в ней синтезируются законы направленной самоорганизации, обеспечивающие выход систем на целевые аттракторы, на которых и происходит динамическая декомпозиция пространства состояний нелинейных систем. В синергетике Г. Хакена основное внимание уделяется процессам стихийной самоорганизации в системах за счет непредсказуемого изменения так называемых «управляющих параметров», в результате чего система выходит на соответствующий аттрактор, на котором и происходит декомпозиция пространства состояний нелинейной системы. Г. Хакен называет созданную им синергетику учением о *взаимодействии*. Тогда нашу теорию нелинейного синергетического синтеза можно назвать наукой о *взаимОСОдействии* в сложных системах. Перейдем теперь к краткому изложению базовых положений этой новой теории.

В трудах нашей научной школы на основе КЕПСУ рассматривается следующая проблема системного синтеза: на основе известных естественных или искусственных (желаемых) закономерностей – инвариантов, отражающих соответствующие нелинейные взаимодействия, синтезировать новые, *системные законы*, позволяющие существенно расширить знание о соответствующей предметной области: небесной механике, космонавтике, управлении системами пространственного движения, системами с регулярными и хаотическими колебаниями, управлении социальными рисками и т.д. Системные законы имеют *динамическую природу*, что принципиально отличает их от известных законов физики, являющихся, как правило, статическими, т.е. описывающими лишь стационарные движения. Это означает, что системные законы включают в себя дополнительные, динамические компоненты, которые «исчезают» на стационарном движении, т.е. не наблюдаются. В этом свойстве и проявляется латентный (скрытый) характер системных законов, что ведет к возникновению неожиданных физических явлений. Отсюда вытекает возможность предсказания новых явлений и свойств соответствующих систем и, следовательно, выявления перспектив переноса естественных закономерностей на искусственные управляемые системы, обладающие принципиально новыми динамическими свойствами.

Окружающая нас среда: экологическая, социально-экономическая, технологическая – это мир сложных суперсистем разнообразной природы, которые представляют собой комплекс различных подсистем, выполняющих определенные функции и связанных между собой процессами интенсивного динамического взаимодействия и обмена энергией, веществом и информацией. Указанные суперсистемы являются *нелинейными, многомерными и многосвязными*, в которых протекают сложные переходные процессы и возникают критические и хаотические режимы. Проблемы системного синтеза, т.е. поиска общих *объективных законов самоорганизации и управления* в такого рода динамических системах, являются весьма актуальными, трудными и во многом практически недоступными для классической науки, в частности, существующей теории управления. Эта теория позволила успешно освоить методы централизованного внешнего воздействия на различные объекты, однако наступило время пересмотра силовых подходов в задачах управления и перехода на идеи самоорганизации синергетики. Отсюда вытекает насущная потребность поиска путей целевого воздействия на процессы самоорганизации в конструируемых динамических системах. Другими словами, возникла необходимость создания способов формирования и резонансного возбуждения *внутренних сил взаимодействия*, которые могли бы породить в фазовом пространстве синтезируемых систем желаемые структуры – аттракторы, адекватные физической (химической, биологической) сущности соответствующей системы. В философском плане такого рода подход к задачам управления согласуется с древнекитайским принципом Дао, который призывает действовать в этом мире в соответствии с природой. По этому поводу китайский философ Люй Бу Вэй писал: «Предположим, силач У Хо со всей силой тянет быка за хвост до такой степени, что хвост оторвался, а сила у силача иссякла. Между тем бык не сдвинулся ни на шаг с места. Это происходит оттого, что человек идет наперекор естественности.

Теперь допустим, мальчик ростом пять чи ведет быка за уздечку и бык подчиняется ему во всем. Это происходит оттого, что человек в данном случае следует *естественноти*.

В литературе имеются разные определения понятия «система», базирующиеся в основном на свойстве взаимодействия между компонентами, входящими в общую систему. Однако выдающийся физиолог П.К. Анохин считал это недостаточным и дал следующее замечательное определение системы: «Системой можно назвать только такой комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимодействие и взаимоотношение приобретают характер *взаимодействия* компонентов на получение фиксированного полезного результата». В этом определении свойство взаимодействия компонентов реализуется путем освобождения их от тех избыточных степеней свободы, которые в данный момент не нужны для достижения конкретного результата – цели биосистемы. Те же степени свободы, которые способствуют достижению поставленной цели, непременно сохраняются механизмом взаимодействия компонентов биосистемы. Весьма важно, что сам результат является тем решающим системообразующим фактором, который активно влияет на отбор степеней свободы, нужных для достижения поставленной цели, т.е. именно желаемый результат создает упорядоченную форму взаимодействия между компонентами биосистемы. Другими словами, выделенное П.К. Анохиным фундаментальное свойство *взаимодействия* представляет собой ярко выраженный и повсеместно проявляющийся в сложных нелинейных системах *синергетический процесс*. Рассмотрим кратко сущность этого процесса с системно-кибернетической точки зрения.

Итак, в настоящее время формируется новая интегральная наука – синергетика, изучающая процессы самоорганизации и охватывающая практически все современные отрасли знаний о косной и живой природе, технические и экономические науки. Эта обобщенная наука основана на нелинейной динамике и термодинамике необратимых процессов. В течение короткого времени синергетика – теория неравновесных процессов – превращается во всеобщую теорию развития, имеющую весьма широкие мировоззренческие последствия. Смысл и содержание этой новой интегральной науки состоит в том, что в открытых системах, обменивающихся с внешней средой энергией, веществом и информацией, возникают *процессы стихийной самоорганизации*, т.е. процессы рождения из физического хаоса некоторых устойчивых упорядоченных структур с новыми свойствами систем. Это общее определение справедливо для систем любой природы. Синергетический подход в науке во многом напоминает классический системный подход, а сама синергетика имеет важные точки соприкосновения с общей теорией систем. Для синергетики, как и для теории систем, важны не поверхностные аналогии между явлениями различной природы, а достаточно строгое соответствие между всеми элементами сравниваемых систем. Такое требование означает поиск *математически изоморфных законов* различной физической (химической, биологической) природы. Общая теория систем изучает системы самого различного характера – концептуальные, материальные, слабо и сильно структурированные и т.д., в то время как для синергетики основным предметом исследования является самостоятельная междисциплинарная область самоорганизующихся систем. В синергетическом подходе, в отличие от общесистемного, изучаются конкретные принципы и механизмы *самоструктурирования* естественных и технических систем. Иначе говоря, в отличие от общей теории систем, синергетика сосредоточивает свое внимание на кооперативных, когерентных и самосогласованных процессах, возникающих в сложных нелинейных системах. Необходимо также отметить, что как для общей теории систем и кибернетики, так и для синергетики, объединяющим понятием является понятие системы. В синергетическом же подходе, помимо формирования общей системной концепции – самоорганизации, обязательно учитывается *конкретное физическое (химическое, биологическое)* содержание рассматриваемых явлений и процессов. Подчеркнем два фундаментальных свойства синергетических систем – это, во-первых, обязательный обмен с внешней средой энергией, веществом и информацией и, во-вторых, непременное *взаимодействие*, т.е. когерентность поведения между компонентами системы.

Однако, несмотря на выдающиеся достижения современной синергетики, *концепция управления и самоуправления* не получила в ней должного развития и обобщения и, следовательно, не заняла подобающего места, хотя во многом и определяет самую сущность процессов

самоорганизации. В соответствии с базовыми положениями синергетики ее отличительной особенностью является стихийная самоорганизация, а истинный смысл возникающих при этом кооперативных процессов заключен во внутренних причинах во многом непредсказуемой самоорганизации систем. Это – *причинный способ самоорганизации*, открытие которого позволило синергетике добиться выдающихся результатов в исследовании кооперативных явлений в системах различной природы. Дело, однако, заключается в том, что для эффективного применения идей синергетики в проблемах системного синтеза причинного способа самоорганизации было явно недостаточно и требовался новый, принципиальный шаг в понимании сущности процессов управления и самоуправления в синергетике. Новизна заключалась в переходе от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению вдоль желаемых инвариантных многообразий – аттракторов, к которым подстраиваются все другие переменные динамической системы. Это уже *способ направленной самоорганизации* синтезируемых систем. При таком подходе цель – аттрактор – определяет сущность процесса, а его истинное понимание состоит в самоуправлении и направленной самоорганизации в соответствии с поставленной целью. С информационной точки зрения этот способ отражает процесс *рецепции информации*, что на языке теории динамических систем означает перевод соответствующей системы в определенное конечное состояние независимо от ее прежнего состояния. В качестве самоуправляемости и направленной самоорганизации нелинейных систем проявляется новый взгляд на проблему системного синтеза, видна тенденция перехода от классических методов кибернетики к современным идеям синергетики. Такой подход позволил создать новую *синергетическую теорию управления* (СТУ), имеющую глубокое естественнонаучное обоснование как приложение принципов самоорганизации в проблемах управления.

Основные особенности СТУ применительно к проблеме системного синтеза состоят, во-первых, в кардинальном изменении *целей поведения* синтезируемых систем; во-вторых, в непосредственном учете *естественных свойств* нелинейных объектов; в-третьих, в формировании *нового механизма генерации обратных связей*, т.е. законов управления. Конкретно суть этих нововведений состоит в следующем:

- целью функционирования синтезируемых систем является достижение целевых аттракторов – асимптотических пределов в их пространстве состояний, отражающих желаемые технологические режимы систем;
- целевые аттракторы и инвариантные многообразия отражают физическую сущность процессов, протекающих в соответствующем объекте. Эти многообразия формируются на основе желаемых технологических инвариантов;
- введение в процедуру синтеза инвариантных многообразий позволяет построить регулярный механизм аналитической генерации естественной совокупности отрицательных и положительных обратных связей, которые формируют процессы направленной самоорганизации в синтезируемых системах.

При синергетическом подходе к синтезу систем целью функционирования замкнутой нелинейной системы, в отличие от классической теории управления, является не только выполнение требований, выдвинутых к характеру переходного процесса, а, в первую очередь, обеспечение желаемого асимптотического поведения системы на аттракторе. Это связано с тем обстоятельством, что поведение любой нелинейной диссипативной системы может быть разделено на этап переходного движения, когда ее траектории устремляются к аттрактору, и этап асимптотического движения на желаемом аттракторе – цели системы. Такой подход позволяет принципиально разрешить проблему аналитического синтеза *общих объективных законов процессов управления* многомерными и многосвязными системами.

Важно подчеркнуть, что основные принципы и методы СТУ в полной мере согласуются с фундаментальными идеями современной «физики соотношений», в которой кардинальное значение придается не силовым внешним воздействиям, на чем основана классическая «физика объектов», например механика, а взаимодействиям между компонентами системы. Причем эти взаимодействия реализуются через динамические *паттерны* – некоторые энергетические «сгустки» (аттракторы) в окружающем поле, пронизывающем все пространство системы. Именно паттерны отражают

динамическую, преходящую природу рассматриваемых явлений. И чем больше энергия, которая перераспределяется в результате образования новых паттернов, тем быстрее идут процессы обмена между компонентами и, следовательно, тем сильнее взаимодействие в соответствующей системе.

Инварианты, самоорганизация, каскадный синтез – это базовые понятия концептуального лексикона СТУ, определяющие ее сущность, новизну и содержание. Развитые методы системного синтеза показали особую эффективность в решении важных прикладных задач управления.

Введение инвариантов в СТУ, как ее ключевых элементов, позволяет придать ей естественно-математическое единство и концептуально-методологическую целостность. Язык инвариантов здесь играет роль базового языка науки, определяющего системную сторону СТУ и устанавливающего непосредственную связь ее с фундаментальными принципами отбора действительных движений из множества возможных на основе соотношений, отражающих законы сохранения в соответствующей предметной области. Иначе говоря, возникает возможность создания прикладной теории системного синтеза, в возможно большей мере учитывающей естественные свойства систем соответствующей природы.

I. ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Болтунов Геннадий Иванович (1), Быстров Сергей Владимирович (1),
Григорьев Валерий Владимирович (1), Мансурова Ольга Карабековна (2),
Першин Иван Митрофанович (3)

1. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий механики и оптики
2. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
3. Северо-Кавказский федеральный университет филиал г. Пятигорск

КАЧЕСТВЕННЫЙ СИНТЕЗ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Для непрерывных линейных динамических объектов с одним входом и выходом разработана процедура синтеза полиномиальных, в частности линейно квадратичных законов управления. Применение таких законов управления позволяет повысить скорость сходимости процессов при больших отклонениях с сохранением качественных показателей процессов при малых отклонениях. Синтез законов управления производится на основе использования методов теории оптимального управления посредством решения уравнения типа Риккати. Доказывается, что используемые законы управления не нарушают свойства асимптотической или экспоненциальной устойчивости, в зависимости от выбранного типа устойчивости при проектировании.

Ключевые слова: линейно квадратичные законы управления, критерии оптимальности, экспоненциальная устойчивость, матричные уравнения Риккати и Ляпунова.

Annotation. For continuous linear dynamic objects with a single inlet and outlet linear quadratic synthesis procedure of control laws was designed. The use of these control laws can improve the speed of convergence processes for large deviations while maintaining quality indicators processes for small deviations. Synthesis of control laws is based on the use of methods of optimal control theory by solving the Riccati type equation. It is proved that the used control laws do not violate the property of asymptotic and exponential stability, depending on the type of stability in design.

Keywords: linear quadratic control laws, optimality criteria, exponential stability, matrix Riccati and Lyapunov equations.

Методы теории оптимального управления широко используются для синтеза линейных законов управления непрерывными стационарными объектами, обеспечивающими тот или иной вид устойчивости замкнутой системы, а следовательно и требуемые показатели качества [1-9]. В данной работе предпринята попытка распространения этих методов для формирования полиномиальных законов управления для непрерывных стационарных объектов управления с целью повышения скорости сходимости процессов при больших начальных отклонениях с последующим замедлением сходимости при малых отклонениях для обеспечения таких качественных показателей как перерегулирование, колебательность процессов. Для решения задачи синтеза управлений используется модифицированное уравнение типа Риккати, позволяющее искать управление как линейную функцию состояний объекта, которое и используется для формирования полиномиальных управляющих воздействий. Доказывается, что подобные управлении сохраняют свойство асимптотической или экспоненциальной устойчивости, в зависимости от того какой вид устойчивости был заложен при поиске линейного закона управления при решении уравнения Риккати.

Постановка задачи. Рассмотрим линейный непрерывный стационарный объект управления (ОУ) с уравнением движения

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (1)$$

где x – n -мерный вектор состояния ОУ, u – скалярное управляющее воздействие, A – квадратная матрица с постоянными коэффициентами размером $n \times n$, B – матрица входов размером $n \times 1$. Будем искать закон управления в виде

$$u(t) = \sum_{i=1}^l u_0^{2i-1}(t) + \sum_{j=1}^l (\text{sign}(u_0(t))) \cdot u_0^{2j}(t), \quad (2)$$

где $l = k/2$, если k – четное число и $l = k+1/2$, если k – нечетное число, при этом k определяет число членов формирующего управления (2), а u_0 – номинальное управляющее воздействие, которое будем искать как линейную функцию вектора состояния вида

$$u_0(t) = -Kx(t), \quad (3)$$

где K – матрица линейных стационарных обратных связей (ЛСОС) размерности $1 \times n$, элементы которой определяют коэффициенты обратных связей по соответствующим переменным вектора состояний $x(t)$. При этом предполагается, что все переменные вектора состояния доступны для измерения. Таким образом, формируемое управление (2) представляет из себя полином степени k от номинального управления (3).

Ставится задача отыскания таких матриц ЛСОС с использованием методов теории оптимального управления, которые в замкнутой системе для объектов управления (1) с законами управления вида (2), (3) обеспечивают экспоненциальную устойчивость тесно связанную с таким показателем качества процессов как быстродействие (время переходного процесса).

Основной результат. Нахождение линейного закона управления с использованием методов теории оптимального управления для стационарного непрерывного объекта управления (1) с квадратичным критерием качества на бесконечном интервале времени сводится к решению матричного квадратичного уравнения типа Риккати вида

$$A^T P + PA - \nu K^T R K = -Q \quad (4)$$

при

$$K = R^{-1} B^T P, \quad (5)$$

где P – симметрическая квадратная матрица размером $n \times n$, Q – симметрическая матрица штрафов на вектор состояния объекта размером $n \times n$, по крайней мере положительно полуопределенная, R – ненулевой скаляр, определяющий штраф на управление, ν – параметр, принимающий значения в пределах от 0 до 2. Уравнение (4) при подстановке в него (5) является квадратичным уравнением Риккати, имеющим два решения относительно матрицы P , из которых выбирается положительно определенное решение, то есть такое решение, при котором матрица P является положительно определенной матрицей.

Заметим, что при значении параметра $\nu = 0$ уравнение (4) превращается в линейное уравнение типа Ляпунова и его решение относительно матрицы P будет положительно определенным тогда и только тогда, когда матрица A является устойчивой матрицей, то есть объект управления устойчив. Этот случай соответствует критерию обобщенной работы для нахождения оптимального управления, введенный в работах Красовского А.А. [1].

При значении параметра $\nu = 1$ получаем уравнение типа Риккати, соответствующее классическому решению задачи оптимального управления, для которого доказано, что одно из решений уравнения Риккати положительно определено (матрица P – положительно определенная матрица и замкнутая система с матрицей ЛСОС (4) будет устойчивой) [3].

Если значение параметра $\nu = 2$, то уравнение Риккати позволяет решать задачу нахождения оптимального управления, соответствующего принципу оптимальности по принуждению [4]. Отметим, что при этом, уравнение Риккати при данном значении параметра ν совпадает с уравнением Ляпунова для замкнутой системы с найденным управлением, позволяющим делать заключение, что если решение уравнения Риккати положительно определено, то система будет асимптотически устойчивой.

Для того чтобы линейный закон управления обеспечивал бы экспоненциальную устойчивость со степенью сходимости α , модифицируем уравнение (4) следующим образом

$$A^T P + PA - \nu K^T R K + 2\alpha P = -Q \quad (6)$$

при

$$K = R^{-1} B^T P. \quad (7)$$

Заметим, что при значении $\nu = 0$ требуется, чтобы исходный объект был бы экспоненциально устойчивым со значением степени сходимости, равным α . В дальнейшем, основное внимание уделим случаю, когда значение параметра $\nu = 2$, то есть когда уравнение (6) является модифицированным уравнением Ляпунова для установления факта, что система с искомым управлением является экспоненциально устойчивой.

Докажем теперь, что если найден закон управления (7) на основании решения уравнения Риккати (6) с заданным значением степени сходимости α , то полиномиальный закон управления вида (2), (3) обеспечивает в замкнутой системе экспоненциальную устойчивость со степенью сходимости равной α .

Положим, что матрица ЛСОС K найдена по выражению (7) в результате решения уравнения Риккати (6) при заданном значении степени сходимости α . Вычислим производную по времени от квадратичной функции Ляпунова на всех траекториях движения системы (объект управления (1) с законом управления вида (2)) и проверим, будет ли выполняться условие экспоненциальной устойчивости [4].

$$\frac{dV(x(t))}{dt} \leq -2\alpha V(x(t)), \quad (8)$$

где $V(x)$ – квадратичная функция Ляпунова вида

$$V(x(t)) = x^T(t) P x(t), \quad (9)$$

а P положительно определенная матрица, являющаяся решением матричного уравнения типа Риккати (6). Производная от функции Ляпунова для замкнутой системы (объект управления (1) с законом управления (2)) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dV(x)}{dt} &= x^T \left(A^T P + PA - K^T B^T P - PBK \right) x - \sum_{i=1}^l u_0^{2i-1}(t) \cdot B^T P x - \sum_{i=1}^l x^T P B \cdot u_0^{2i-1}(t) \\ &\quad - \sum_{j=1}^l (\text{sign}(u_0(t))) \cdot u_0^{2j}(t) \cdot B^T P x - \sum_{j=1}^l (\text{sign}(u_0(t))) \cdot x^T P B \cdot u_0^{2j} \end{aligned} \quad (10)$$

Воспользуемся тем, что матрица K закона управления вычисляется по соотношению (6), тогда выражение для производной от функции Ляпунова можно привести к виду

$$\frac{dV(x)}{dt} = x^T \left(A^T P + PA - K^T B^T P - PBK \right) x - 2 \sum_{i=1}^l u_0^{2i} R^{-1} - 2 \sum_{j=1}^l (\text{sign} u_0) \cdot u_0 u_0^{2j} R^{-1}$$

или

$$\frac{dV(x)}{dt} = x^T \left(A^T P + PA - 2K^T R^{-1} K \right) x - 2 \sum_{i=1}^l u_0^{2i} R^{-1} - 2 \sum_{j=1}^l (\text{sign} u_0) \cdot u_0^{2j+1}. \quad (11)$$

Если матрица P , определяющая квадратичную функцию Ляпунова (8), найдена как положительно определенное решение уравнения Риккати (6), при значении параметра $\nu = 2$ и с заданной степенью сходимости α , то выполняется равенство

$$x^T \left(A^T P + PA - 2K^T R K - 2\alpha P \right) x = -x^T Q x,$$

а так как выражение $x^T Q x \geq 0$, по крайней мере, положительно полуопределенено, справедливо неравенство

$$x^T \left(A^T P + PA - 2K^T R K \right) x \leq -2\alpha x^T P x. \quad (12)$$

При этом, в силу того, что квадратичные члены

$$u_0^{2i} \cdot R^{-1} \geq 0 \quad (13)$$

и

$$(sign u_0) u_0^{2j+1} \geq 0 \quad (14)$$

по крайней мере, положительно полуопределены, то их добавление в неравенство (11) может только усилить это неравенство, откуда следует выполнение неравенства

$$\frac{dV(x)}{dt} = x^T (A^T P + PA - 2K^T R^{-1} K) x - 2 \sum_{i=1}^l u_0^{2i} R^{-1} - 2 \sum_{j=1}^l (sign u_0) \cdot u_0^{2j+1} \leq -2\alpha x^T Px, \quad (15)$$

что подтверждает выполнение условия экспоненциальной устойчивости со степенью сходимости равной α .

И так, последовательность процедуры синтеза полиномиальных законов управления (2), обеспечивающих экспоненциальную устойчивость, заключаются в следующем. По заданному требованию к быстродействию замкнутой системы, например, по требуемому времени переходного процесса t_m выбирается заданная степень сходимости процесса по соотношению

$$\alpha = \frac{3}{t_m}. \quad (16)$$

Далее решается матричное уравнение Риккати (6) относительно матрицы P с последующим вычислением матрицы K по выражению (7), в результате формируется закон управления вида (2).

Расширение результата.

Использование условий качественной экспоненциальной устойчивости [6,7] для нахождения закона управления позволяет в замкнутой системе обеспечить не только требуемую скорость сходимости процессов по сравнению с условиями экспоненциальной устойчивости, но и уменьшить степень их колебательности. Поэтому перспективно направление, связанное с алгоритмами вычисления закона управления на основе решения матричного уравнения Риккати вид

$$(A - BK - \beta I)^T P (A - BK - \beta I) - r^2 P = -Q$$

относительно положительно определенного решения в виде матрицы P с последующим вычислением закона управления в виде матрицы K по соотношению

$$K = (R + B^T P B)^{-1} B^T P (A - \beta I).$$

Параметр β характеризует среднюю скорость сходимости процессов, а параметр r допустимые отклонения осредненных траекторий движения. Значение параметра с точностью до знака может вычисляться по соотношению (16), а параметр $r \approx 0,1|\beta|$. Причем параметры β и r качественной экспоненциальной устойчивости должны удовлетворять соотношению

$$\beta + r < 0 \quad \text{при } r > 0$$

Заключение. Предложена процедура вычисления полиномиальных законов управления на основе использования методов теории оптимального управления, обеспечивающих экспоненциальную устойчивость с заданной степенью сходимости процессов, назначаемую по требуемому быстродействию системы. Для оценки качества процессов и построения областей, в которых выполняются эти показатели можно использовать результаты статей [9,10].

Перспективным является использование подобных управлений в системах пространственного слежения [11], в которых при наличии нелинейности на входе объекта имеющей при больших отклонениях ниспадающий участок пеленгационной характеристики квадратичная составляющая закона управления позволяет ускорить сходимость процессов, а также для систем с распределенными параметрами [12].

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) Министерства образования и науки РФ (проект 14.Z50.31.0031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами / А.А.Красовский, В.Н.Буков, В.С.Шендрик ; под ред. А.А.Красовского. – М. : Наука, 1977, - 271 с.
2. Nair G.N. Evans R.I. Exponential stabilisability of finite-dimensional linear systems with limited data rates // Automatica. 2003. Vol. 39. P/ 585-593.
3. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1972. 544 с.
4. Фурасов В.Д. Устойчивость движения, оценки и стабилизация. – М.: Наука, 1977. – 247 с.
5. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Особые линейные и нелинейные системы. – М.: Энергия, 1981. – 303с.
6. Grigoriev V.V., Mansurova O.K. Qualitative exponential stability and instability of dynamical systems. Preprints of 5 th IFAK Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS'01). St.Petersburg , 2001.
7. Быстров С.В., Григорьев В.В. Qualitative Exponential Stability and Instability of Dynamical Systems and Range Estimation of Parameter Acceptable Changes // Universal Journal of Control and Automation. - 2013. - Vol. 1. - N 1. - P. 15-18. - 4 p. - DOI 10.13189.
8. Быстров С.В., Григорьев В.В., Рабыш Е.Ю., Мансурова О.К. Анализ качества переходных процессов в непрерывных и дискретных системах на основе условий качественной экспоненциальной устойчивости // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – Москва, 2012. - № 9. Методы теории автоматического управления. – С. 32-36.
9. Григорьев В.В., Быстров С.В., Наумова А.К., Рабыш Е.Ю., Черевко Н.А. Использование условий качественной экспоненциальной устойчивости для оценки динамических процессов. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т.54, № 6. – С. 24-30.
10. Бобцов А.А., Быстров С.В., Григорьев В.В., Дудров П.В., Козис Д.В., Костина О.В., Мансурова О.К. Построение областей допустимых изменений параметров гарантированного качества процессов динамических систем. Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 10. С. 2-5.
11. Григорьев В.В., Мотылькова М.М., Мансурова О.К. Построение регуляторов для систем пространственного слежения. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т.50, № 11. – С. 24-29.
12. Быстров С.В., Григорьев В.В., Мансурова О.К., Першин И.М. Анализ устойчивости линейных систем с распределенными параметрами. Мехатроника, автоматизация, управление. - Москва: Новые технологии, 2013. - № 9. - С. 2-5.

ТЕОРИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ: СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Аннотация. В докладе на основе рассмотрения принципов организации иерархических структур в системах различной природы и выполненного обзор существующих подходов к проблеме нахождения управляющих воздействий для такого типа систем предлагается новый подход к проблеме иерархического синтеза многосвязных, многомерных, нелинейных систем управления. Применение предложенного подхода демонстрируется на примере синтеза иерархических систем управления манипуляционными роботами.

Ключевые слова: иерархическая структура, системный синтез, нелинейные системы, робототехнические системы, синергетика.

Annotation. A new approach to the problem of hierarchical synthesis of multiply connected, multidimensional, nonlinear control systems is proposed in the report on the basis of consideration of the principles of organization of hierarchical structures in systems of various nature and a review of existing approaches to the problem of finding control effects for this type of systems. The application of the proposed approach is demonstrated by the example of the synthesis of hierarchical control systems for manipulation robots.

Keywords: hierarchical structure, system synthesis, nonlinear systems, robotic systems, synergistics.

Введение

Согласно современным научным представлениям мир представляет собой совокупность огромного числа развивающихся систем и подсистем различного рода. Технический прогресс служит возникновению искусственных систем с все более сложной структурой, состоящих из множества подсистем, связанных процессами динамического взаимодействия и обмена энергией, веществом и информацией. Практически любая современная техническая система представляет собой комплекс различных подсистем, машин, установок и агрегатов, выполняющих определенные функции и находящихся в постоянном взаимодействии между собой.

Феноменология рассматриваемых в статье сложных технических систем заключается в том, что, во-первых, они могут быть представлены в виде совокупности иерархически организованных подсистем, а, во-вторых, эти системы управляемы. Под иерархической системой мы будем понимать совокупность вертикально расположенных взаимодействующих подсистем, организующих отдельные иерархические уровни. При этом на процесс функционирования любой подсистемы оказывают непосредственное воздействие подсистемы вышеуказанного уровня, осуществляя координацию их действий. Исследование поведения таких систем затруднено из-за того, что они характеризуются огромным количеством переменных и параметров, наличием большого числа перекрестных связей, процессы взаимодействия в них обычно описываются нелинейными математическими моделями. Еще более сложной является задача синтеза законов управления такими системами. Большинство методов теории управления здесь наталкиваются на непреодолимое препятствие – многомерность, многосвязность и нелинейность процессов в этих системах. Именно поэтому представляется актуальным разработка нового подхода к синтезу иерархических стратегий управления многосвязными динамическими системами.

В рассматриваемых системах на каждом иерархическом уровне для подсистемы допускается характерное описание для соответствующего пространства переменных и параметров [1]. В таких системах на каждом уровне на соответствующую подсистему оказывается непосредственное воздействие подсистемы, расположенной на вышестоящем уровне. Однако, хотя данное воздействие является для подсистем нижележащих уровней обязательным и в нем выражается приоритет действия и целей более высоких уровней [2], взаимодействие между вышестоящим

элементом и каждым из нижестоящих элементов таково, что успех действия одного из них зависит от действий другого. Таким образом, эффективность действия системы в целом зависит не только от *вмешательства*, направленного сверху вниз, но и от отклика снизу вверх, т.е. от согласованного поведения всех элементов системы.

Представление исследуемых процессов в виде иерархической совокупности взаимодействующих подсистем обусловлено стремлением распределения между ними функций обработки информации и принятия решений по выбору управляющих воздействий. В работах Н.Н. Моисеева [3, 4] рассматриваются информационные аспекты анализа иерархических систем. Децентрализация процессов сбора и обработки информации может способствовать упрощению технических средств системы и повышению ее эффективности функционирования. Однако при этом возникают дополнительные проблемы, связанные с агрегированием информации и появлением противоречий между системой и ее компонентами, проявляющиеся в нетождественности их интересов.

Иерархическая организованность присуща системам различной природы. В природных, социальных и экономических системах структурирование бывает часто условным и выполняется ради достижения определенных целей, решения определенных задач [5]. Номенклатура технических систем, характеризующихся наличием иерархической упорядоченности входящих в них компонентов, достаточно разнообразна. К таким системам относятся электромеханические, робототехнические, электроэнергетические, теплоэнергетические и др.

1. Проблема синтеза иерархических систем управления

Проектирование стратегий управления большими системами часто вызывает затруднение, обусловленное их сложностью, связанное с числом входящих в эти системы компонентов, видом их взаимосвязи и необходимостью оперирования большим количеством координат состояния. В связи с этим в теории синтеза систем получило довольно широкое развитие направление, связанное с идеями декомпозиции сложных динамических систем на более простые независимые подсистемы [6 – 19]. Большинство методов, опирающихся на принцип декомпозиции, используют численные процедуры при синтезе алгоритмов управления [6, 7], что обуславливает их низкую эффективность в реальных системах, так как при их применении необходимо иметь полную информацию о структуре и параметрах математической модели динамической системы. В монографии [8] представлен дифференциально-геометрический подход к редукции управляемых систем, согласно которому, с использованием теории категорий или теории структур Бурбаки, исходному нелинейному объекту сопоставляется изоморфный объект, факторобъект и подобъект. Основной проблемой в применении данного подхода является то, что для каждой категории объектов требуется построение соответствующего математического аппарата, имеющего дифференциально-геометрический характер.

В работах Е.С. Пятницкого [11–13] развиты методы синтеза иерархических систем управления (ИСУ), базирующиеся на принципе декомпозиции, согласно которому вначале вводятся компенсирующие взаимовлияние подсистем обратные связи, а затем в режиме декомпозиции строится координирующее управление, обеспечивающее выполнение на траекториях движения системы цели управления. А.А. Красовским было предложена идея построения иерархических структур алгоритмов управления с разделением исходной динамической системы на медленные и быстротечные процессы [14]. Методы синтеза систем управления нелинейными динамическими системами, описываемыми уравнениями Лагранжа, предложены в работах Ф.Л. Черноуско [15–17]. В основу этого подхода положен принцип декомпозиции, согласно которому динамическая система указанного класса сепарируется на отдельные подсистемы, представляющие собой линейные системы с одной степенью свободы. При этом предполагается, что максимальные значения нелинейных компонентов исходной модели системы и внешних возмущений ограничены и меньше чем допустимые величины управляющих значений. Законы управления сепаратными моделями ищутся с применением игрового подхода.

Предложенный в [17] подход к синтезу координирующих и автономных алгоритмов управления лагранжевыми системами, базирующийся на принципе декомпозиции [16, 17] и методе

обратных задач динамики, получил свое развитие в работах П.Д. Крутько [18, 19]. В методах, развиваемых П.Д. Крутько, основой в построении управляющих воздействий является условие, при котором в процессе движения ИТ управляемой системы мгновенные значения локальных функционалов, вычисляемых в окрестности траекторий эталонных моделей, находились бы в малой окрестности экстремума–минимума. Этalonные модели навязываются каждой из подсистем, соответствующих отдельной степени свободы, из технических требований к динамическим характеристикам проектируемой системы [17–19].

Таким образом можно выделить следующие основные тенденции в построении систем управления нелинейными, многомерными и многосвязными динамическими объектами. Во-первых, это ограниченность применения таких подходов для отдельных классов математических моделей, описывающих поведение управляемых объектов, в первую очередь это системы со скалярным управлением. Во-вторых, это отсутствие регулярных процедур учета взаимовлияния между каналами регулирования выходных величин проектируемых систем, от которого стремятся избавиться либо путем компенсации перекрестных обратных связей, либо учитывая эти взаимодействия в виде ограниченных неизмеряемых возмущающих воздействий. Указанные особенности методов синтеза управляющих воздействий не позволяют проектировать системы управления, отражающие в полной мере физическую (химическую, механическую и др.) сущность процессов, протекающих в исследуемых объектах. Принципиально другой подход к проблеме конструирования систем управления многомерными, многосвязными, нелинейными динамическими объектами выдвинут в синергетической концепции системного синтеза [20, 21].

2. Постановка задачи синергетического синтеза иерархических систем управления

Применение идеологии синергетической теории управления (СТУ) к проблеме проектирования многоуровневых систем принятия решений позволяет сформулировать следующим образом постановку задачи синтеза иерархических систем управления (ИСУ). Если некоторую многосвязную динамическую систему можно представить в виде совокупности

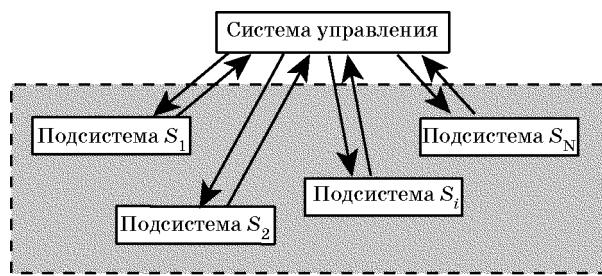


Рисунок 1 – Структура иерархической системы

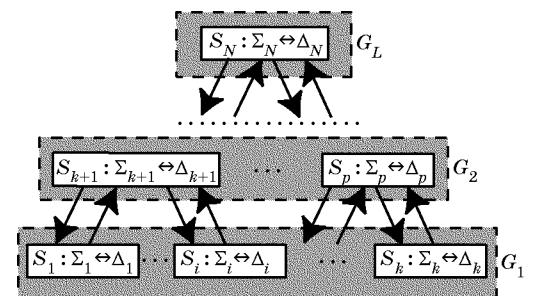


Рисунок 2 – Иерархическая структура подчинения целей

взаимодействующих подсистем $S_i, i = \overline{1, N}$ (рис. 1), то при разработке стратегий управления ею необходимо сформировать множество целей в виде набора технологических, электромагнитных, энергетических и других инвариантов Φ как для отдельных подсистем, так и для всей системы в целом, выполнение которых должна обеспечивать синтезируемая ИСУ. При этом данное множество можно представить в виде *иерархической структуры подчинения целей*, т.е. разбить его на некоторое количество подмножеств $\Sigma_j, j = \overline{1, M}$, состоящих из целей для конкретных подсистем, либо для группы подсистем $G_i, i = \overline{1, L}$, либо для всей системы в целом (рис. 2), так что

$$\bigcup_{j=1}^M \Sigma_j = \Phi \quad (1)$$

Для того чтобы синтезируемая система обеспечивала выполнение целей (1), она должна на каждом уровне вырабатывать соответствующее множество решений Ξ , которое аналогично (1) состоит из подмножеств решений $\Delta_j, j = \overline{1, M}$:

$$\bigcup_{j=1}^M \Delta_j = \Xi . \quad (2)$$

Таким образом, на каждом иерархическом уровне подмножеству целей $\Sigma_j, j = \overline{1, M}$ ИСУ ставит в соответствие подмножество решений $\Delta_j, j = \overline{1, M}$. Подмножества $\Sigma_j, j = \overline{1, M}$ и $\Delta_j, j = \overline{1, M}$ разделяются на группы $G_i, i = \overline{1, L}$, соответствующие определенному *уровню сложности принятия решения* (см. рис. 2) [2], и, как отмечалось выше, сложная проблема принятия решений (2) для выполнения множества целей (1) разбивается на группы последовательных более простых проблем с соответствующими подмножествами целей Σ_j и решений Δ_j , так что решение более простых задач обеспечивает в совокупности решение исходного множества проблем (1). При этом множество решений, вырабатываемое на верхнем уровне (ВУ), непосредственно зависит от информации, поступающей от нижестоящих подсистем. Однако, обладая приоритетом действия, вышестоящий уровень обязан вырабатывать такую совокупность решений, чтобы обеспечить выполнение поставленной перед системой в целом задачи функционирования. В то же время проблема выбора принципов взаимодействия между подсистемами верхнего и нижнего уровней заключается в координации действий нижестоящих элементов вышестоящим с учетом того, как элементы нижнего уровня (НУ) сообщаются между собой и какие параметры целей НУ могут подвергаться изменению для улучшения глобального результата.

Следует отметить, что при управлении сложными динамическими системами могут возникать внутренние противоречия и конкурентные физические процессы. При этом существующие в настоящее время методы системного анализа не позволяют в полной мере учитывать такого рода действующие противоречия. Это связано с тем, что важнейшим элементом научно-технического прогресса при создании сложных динамических систем является *автоматическое управление*, а системно-информационный анализ таких управляемых систем – это действенный инструмент для оценки эффективности их функционирования и развития. Представление об управлении сложными системами неразрывно связано с понятиями: *информация, организованность функционирования и цель*. Однако в современной литературе размыто четкое понимание сущности информационных процессов, связанных с управлением. В этой связи необходимо подчеркнуть, что при информационном анализе процессов управления информация должна рассматриваться как средство достижения цели при обязательном учете ее ценности. Это связано с тем, что для управления важна лишь та информация, которая конкретно полезна и используется для достижения цели. Системно-информационный анализ имеет особое значение для таких систем, так как они представляют собой совокупность большого числа иерархически зависимых локальных подсистем, обладающих определенной степенью автономности и объединенных между собой *средствами организации*, исходя из действующей иерархии целей, в общем случае энергетическими, вещественными и информационными связями для обеспечения целенаправленного функционирования всей системы как единого целого.

При информационном подходе модель системы представляется *иерархической структурой*, на НУ которой находятся участки локальных процессов, а на более высоких уровнях размещаются узлы управления, связанные с объектами управления и между собой каналами связи. Информация, циркулирующая в общей модели системы, должна представляться в трех формах: *осведомляющей, управляющей и преобразующей*, определяющей закономерности поведения узлов управления. Такие структуры отражают важную особенность этих систем – целенаправленность их функционирования и связь информации с целями управления.

Следует особо подчеркнуть, что функционирование рассматриваемых систем протекает в мире различных внутренних и внешних противоречий, которые вовсе не обязательно будут антагонистическими и, следовательно, должным образом построенное взаимосогласованное целенаправленное управление подсистемами позволит обеспечить заданные свойства технологического гомеостазиса всей системы. В поставленной проблеме согласованного

управления системой возникает необходимость изучения влияния противоречий на ее работу и поиска методов компромисса в подсистемах.

Для устранения конфликтов между подсистемами следует, очевидно, организовать их эффективное *взаимосогласованное функционирование путем введения соответствующего управления*. Итак, взаимодействия между подсистемами во многом определяются отношениями между действиями их узлов управления или между заданными им целями и, следовательно, при конкуренции и конфликте могут характеризоваться противоречием.

Цели функционирования подсистем в нормальных режимах работы обычно остаются неизменными (или меняющимися в экстренных ситуациях), а их достижение носит циклически повторяющийся характер. Будем полагать, что управление подсистемами стремится полностью отработать заданные им цели функционирования. Тогда действующее противоречие между подсистемами выступает как противоречие между их целями, а само противоречие определяется двумя показателями: *различием целей подсистем и степенью противоположности этих целей*.

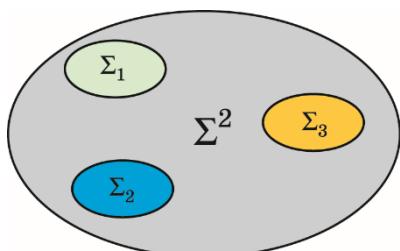


Рисунок 3 – Множественность целей сложной системы

Для наглядности на рис. 3 представлен пример множественности целей подсистем сложной системы. Локальные цели Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 трех подсистем, находящихся в группе G_1 , противоречивы. Однако путем введения более важной общей цели второго порядка Σ_4 , относящейся к группе G_2 , достигается компромисс поведения этих подсистем. Для

этого необходимо ввести координирующее управление. Тогда локальные цели Σ_1 , Σ_2 , Σ_3 , ..., Σ_i не будут противоречивы целям второго, третьего и L -порядка. Итак, в сложной системе можно построить множество подцелей управления.

Возникает важная задача организации взаимосогласованного поведения подсистем, например, S_1 и S_2 , за счет координирующего управления. В зависимости от алгоритмов управления C_1 и C_2 взаимодействие подсистем S_1 и S_2 может быть либо конфликтным, либо бесконфликтным. На рис. 4 представлен случай, когда имеется общее управление C_Σ , координирующее поведение подсистем S_1 и S_2 таким образом, чтобы, во-первых, исключить развитие конфликта между ними; а во-вторых, целенаправленно регулируя имеющиеся противоположные воздействия (F_{c1} и F_{c2}) через технологический процесс подсистем друг на друга, поддерживать их нормальное функционирование при различных возмущающих факторах (см. рис. 4). Итак, взаимодействия между подсистемами сложной динамической системы во многом будут определяться отношениями между действиями их узлов управления или между заданными им целями. При возникновении конкуренции взаимодействия между подсистемами могут быть конфликтными и, следовательно, носить характер противоречия. Аналогичный, но более сложный сценарий можно построить при конкурентном взаимодействии трех и большего числа подсистем.

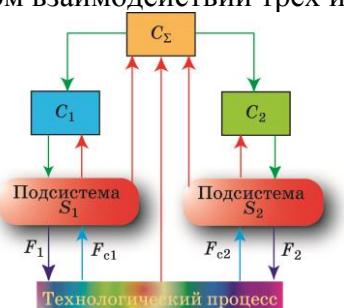


Рисунок 4 – Пример системы

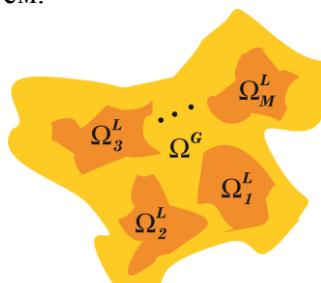


Рисунок 5 – Структура поглощения атTRACTоров

Действующие противоречия внутри такой системы вызывают в ней дополнительные затраты энергии, вещества и информации. Это своего рода «плата» за действующие противоречия и в этом состоят их негативные последствия. *Если же осуществлять координирующее управление противоречиями, действующими между конкурирующими подсистемами, исходя из глобальных целей всей системы, то можно существенно повысить качество управления ею, целенаправленно используя имеющиеся ресурсы энергии, вещества и информации.* Это уже будут позитивные последствия противоречий. Известно, что такой принцип управления противоречиями взят на вооружение живыми организмами, но за него они платят избыточностью в виде дополнительных затрат энергии, вещества и информации. Таким образом, действующие противоречия на уровне конкурирующих подсистем вызывают у них внутренние негативные последствия, а на уровне всей системы при условии оптимального координирующего управления – создает позитивные последствия.

Следует отметить, что отличительной особенностью предлагаемого подхода к синтезу многосвязных динамических систем является то, что, во-первых, применение синергетической идеологии позволяет провести естественную динамическую декомпозицию сложной нелинейной многосвязной системы на множество подсистем; во-вторых, в результате синергетического синтеза каждая из подсистем (или групп подсистем) «погружается» на пересечение соответствующих локальных аттракторов – инвариантных многообразий, отражающих конкретное подмножество

целей Σ_j , а вся система в целом «погружается» в *глобальный аттрактор* (рис. 5), соответствующий исходному множеству целей (1); и, в-третьих, на более высоком уровне сложности принятия решений учитывается поведение подсистем, находящихся на нижних уровнях, в виде уравнений, описывающих их «остаточную динамику» – поведение на локальных аттракторах (инвариантных многообразиях) [22 – 25]. Эти особенности синергетического синтеза ИСУ позволяют избежать проблем, связанных с агрегированием информации, и возникновения противоречий в принятии решений [3, 4]. В предлагаемом подходе степень агрегирования информации о процессах на каждом уровне иерархии определяется соответствующей совокупностью целей и уровнем абстрагирования моделей подсистем. Эта агрегированная информация отражается в вводимых макропараметрах. За счет того, что в математическую модель подсистемы более высокого уровня включена «остаточная динамика» подчиненных подсистем, принятие решений регулятором вышестоящего уровня формируется с учетом динамики поведения нижележащих подсистем на введенных инвариантных многообразиях, тем самым исключая возможность возникновения противоречий между подсистемами смежных уровней иерархии.

В основу предлагаемого подхода положена процедура последовательного погружения подсистем в области притяжения соответствующих целевых аттракторов, называемая в СТУ *эстафетой аттракторов* [21], которую можно сравнить по своей сути с *эффектом лестницы* в теории эволюционной кибернетики [26]. Действительно, погружая совокупность подсистем НУ в области притяжения их аттракторов, осуществляется метасистемный переход, в результате которого появляется подсистема (более высокого уровня), обладающая принципиально новыми свойствами по сравнению с совокупностью входящих в нее подсистем. При этом воздействия, являющиеся управляющими для подсистем НУ, преобразуются в управляемые в подсистеме более высокого уровня. Данное преобразование соответствует синергетическому принципу *эквивалентности (сохранения) управлений*. Принцип эквивалентности управлений широко используется в предлагаемом подходе как на этапе синтеза локальных стратегий управления, так и при синтезе координаторов-регуляторов более высоких уровней. Но, помимо этого, при переходе к более высокому уровню (метасистемном переходе) подсистема ВУ наделяется принципиально новым видом деятельности, заключающимся в управлении деятельностью, т.е. подсистема ВУ способна не просто контролировать и управлять процессом движения подчиненных ей подсистем НУ, а наделяется дополнительной возможностью воздействовать на деятельность этих подсистем, изменения их цели движения – целевые аттракторы.

3. Процедура синтеза

Практически любую сложную систему можно представить в виде двухуровневой структуры, состоящей подсистем из нижнего и верхнего уровня. Предположим, что поведение подсистемы ВУ описывается векторным дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} S_N : \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{M} + \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{f})\mathbf{f}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x})\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{x} \in \Re^n$ – вектор состояния подсистемы ВУ; $\mathbf{y} \in \Re^r$ – вектор выхода; $\mathbf{M} \in \Re^{N-1}$ – вектор управляющих воздействий подсистемы ВУ; $\mathbf{f} \in \Re^9$ – вектор возмущающих воздействий; $\mathbf{A}(\mathbf{x})$, $\mathbf{B}(\mathbf{x})$, $\mathbf{C}(\mathbf{x})$ и $\mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{f})$ – функциональные матрицы состояния, входа, выхода и возмущения размерности $n \times n$, $n \times (N-1)$, $r \times n$ и $n \times 9$ соответственно.

Поведение каждой из подсистем НУ описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} S_j : \dot{\mathbf{z}}^{(j)}(t) &= \mathbf{R}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})\mathbf{z}^{(j)} + \mathbf{P}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})\mathbf{u}^{(j)} + \mathbf{S}^{(j)}\mathbf{v}^{(j)}, \quad j = \overline{1, N-1}; \\ K_j &= \mathbf{d}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})\mathbf{z}^{(j)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{z}^{(j)} \in \Re^{\eta_j}$ – вектор состояния j -й подсистемы НУ; K_j – выходная переменная j -й подсистемы; $\mathbf{u}^{(j)} \in \Re^{\mu_j}$ – вектор управляющих воздействий j -й подсистемы; $\mathbf{v}^{(j)} \in \Re^{\sigma_j}$ – вектор возмущающих воздействий, действующий на j -ю подсистему НУ; $\mathbf{R}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})$, $\mathbf{P}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})$, $\mathbf{S}^{(j)}$ – матрицы размерности $\eta_j \times \eta_j$, $\eta_j \times \mu_j$ и $\eta_j \times \sigma_j$ соответственно; $\mathbf{d}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})$ – матрица-строка выхода.

Между верхним и нижним уровнями иерархии существует связь в виде следующего уравнения

$$\mathbf{M} = \mathbf{F}(\mathbf{K}), \quad (5)$$

где $\mathbf{K} = [K_1 \ K_2 \ \dots \ K_{N-1}]^T$.

На первом этапе синтеза определим подмножества целей – инвариантов для подсистем нижнего уровня. В эти подмножества должны входить, в первую очередь, инварианты, обеспечивающие выполнение конечной задачи управления – технологические инварианты, а также инварианты, которые задают выполнение в синтезируемых системах управления подобъектами $S_j, j = \overline{1, N-1}$ некоторых соотношений, при этом размерность подмножества Σ_j не может превышать размерность вектора управления μ_j соответствующей подсистемы $S_j, j = \overline{1, N-1}$. На основе сформированных подмножеств $\Sigma_j, j = \overline{1, N-1}$ вводится последовательно-параллельная совокупность инвариантных многообразий $\Psi^{(j)} = 0$, удовлетворяющих решению однородного векторного дифференциального уравнения

$$\dot{\Psi}^{(j)}(t) + \Lambda^{(j)}\Psi^{(j)} = 0. \quad (6)$$

Матрица $\Lambda^{(j)}$ такова, что решение $\Psi^{(j)} = 0$ уравнения (6) асимптотически устойчиво.

Используя стандартные процедуры основного метода синтеза СТУ – метода *аналитического конструирования агрегированных регуляторов* (АКАР) [19, 20], или его дискретного аналога – метода *аналитического конструирования агрегированных дискретных регуляторов* (АКАДР) [27, 28], можно синтезировать регуляторы для подсистем НУ, обеспечивающие выполнение заданных совокупностей инвариантов. В случае синтеза дискретно-непрерывных регуляторов методом АКАДР необходимо предварительное преобразование моделей системы, посредством аппроксимации дифференциального оператора разностным, например, по формуле Эйлера.

При попадании изображающих точек (ИТ) подсистем $S_j, j = \overline{1, N-1}$ в окрестность пересечения соответствующей совокупности инвариантных многообразий $\Psi^{(j)} = 0$ поведение подобъектов будет описываться декомпозированными системами уравнений пониженной размерности – уравнениями «остаточной динамики»:

$$\begin{aligned} S_j : \dot{\hat{\mathbf{z}}}^{(j)}(t) &= \hat{\mathbf{R}}^{(j)}(\hat{\mathbf{z}}^{(j)}, \boldsymbol{\varphi}^{(j)}) \hat{\mathbf{z}}^{(j)} + \hat{\mathbf{S}}^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}; \quad j = \overline{1, N-1}; \\ M_j &= \mathbf{d}^{(j)}(\hat{\mathbf{z}}^{(j)}, \boldsymbol{\varphi}^{(j)}) \hat{\mathbf{z}}^{(j)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\boldsymbol{\varphi}^{(j)}$ – задающее воздействие для j -й подсистемы.

Отличительной особенностью предлагаемого подхода является то, что при синтезе регулятора ВУ учитывается остаточная динамика подсистем НУ, тогда с учетом (7) и уравнения связи (5) можно записать расширенную модель подсистемы ВУ

$$\begin{aligned} S_N : \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= \tilde{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\varphi}) \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{f}) \mathbf{f}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}) \mathbf{x}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь $\hat{\mathbf{x}}$ – расширенный вектор состояния подсистемы ВУ.

На этапе синтеза координирующего регулятора необходимо определить подмножество целей подсистемы ВУ (8), на основе которого формируется последовательно-параллельная совокупность инвариантных многообразий $\Psi^{(N)} = 0$, удовлетворяющая решению векторного дифференциального уравнения

$$\dot{\Psi}^{(N)}(t) + \Lambda^{(N)} \Psi^{(N)} = 0. \quad (9)$$

Таким образом, в результате синтеза ИСУ находятся наборы локальных регуляторов–исполнителей

$$\mathbf{u}^{(j)} = \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)}, \boldsymbol{\varphi}^{(j)}), \quad j = \overline{1, N-1}, \quad (10)$$

вырабатывающих совокупность подмножеств решений $\Delta_j, j = \overline{1, M}$ и обеспечивающих выполнение совокупности подмножеств целей $\Sigma_j, j = \overline{1, \dots, M}$. Кроме того, формируется также координирующий регулятор

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}), \quad (11)$$

который вырабатывает подмножество решений Δ_N , обеспечивающих выполнение подмножества целей Σ_N .

4. Синергетический синтез ИСУ манипуляционных роботов

Структура ИСУ манипуляционного робота (МР) состоит из иерархически связанных взаимодействующих подсистем принятия решений (рис. 6), которые на каждом уровне иерархии определяют движение соответствующей подсистемы объекта так, чтобы выполнялась поставленная технологическая задача управления. При этом математическая модель механической подсистемы S^N с n степенями подвижности [29] описывается векторным дифференциальным уравнением:

$$\begin{aligned} S^N : P_j &= \mathbf{h}_j(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}(t) + \dot{\mathbf{q}}^T(t) \mathbf{C}_j(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}(t) + g_j(\mathbf{q}) \equiv \\ &\equiv \mathbf{h}_j(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}}(t) + \eta_j(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}(t)), \quad j = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (12)$$

где P_j – моменты или силы, действующие в j -й степени подвижности; g_j – гравитационные моменты (силы); \mathbf{h}_j – n -вектор инерции; \mathbf{C}_j – $n \times n$ -матрица центробежных и кориолисовых эффектов; η_j – центробежные, кориолисовы и гравитационные силы, при этом $\eta_j(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}(t)) = \dot{\mathbf{q}}^T(t) \mathbf{C}_j(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}(t) + g_j(\mathbf{q})$; $\mathbf{q} \in \mathfrak{R}^n$ – вектор обобщенных координат механизма,

$\mathbf{q} = [q_1 \dots q_n]^T$, q_j соответствует j -й степени подвижности; а, модели подсистем приводов $S^{(j)}$, $j = \overline{1, n}$

$$S_j : \dot{\mathbf{z}}^{(j)}(t) = \mathbf{R}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})\dot{\mathbf{z}}^{(j)} + \mathbf{P}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})\mathbf{u}^{(j)} + \mathbf{S}^{(j)}M_{cm}^{(j)}; j = \overline{1, n};$$

$$m_j = \mathbf{d}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)})\dot{\mathbf{z}}^{(j)}, \quad (13)$$

где $\mathbf{z}^{(j)} \in \Re^{\sigma_j}$ – вектор состояния j -й подсистемы приводов; m_j – выходная переменная j -й подсистемы, т.е. момент, развиваемый в данной подсистеме исполнительным приводом; $\mathbf{u}^{(j)} \in \Re^{\mu_j}$ – вектор управляющих воздействий j -й подсистемы; $M_{cm}^{(j)}$ – статический момент нагрузки, действующий на j -ю подсистему приводов; $\mathbf{R}^{(j)}$, $\mathbf{P}^{(j)}$ – матрицы состояния и входа размерности $(\sigma_j \times \sigma_j)$ и $(\sigma_j \times \mu_j)$ соответственно; $\mathbf{S}^{(j)}$ – матрица-столбец; $\mathbf{d}^{(j)}$ – матрица-строка выхода.

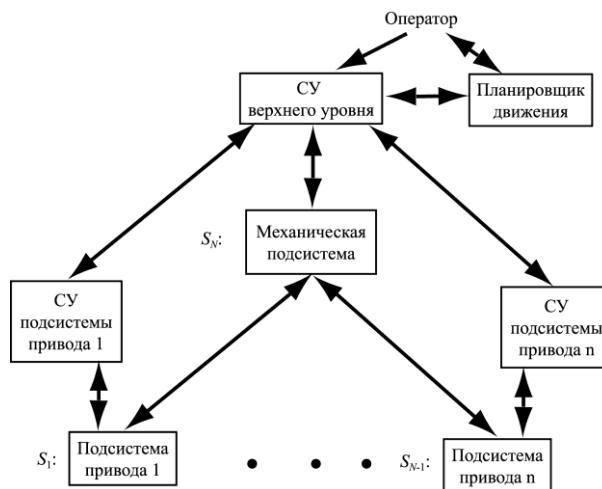


Рисунок 6 – Иерархическая структура СУ МР

Применение идеологии СТУ к проблеме проектирования ИСУ МР требует формирования множества целей в виде набора технологических, электромагнитных, энергетических и других инвариантов Φ как для отдельных подсистем, так и для всей системы в целом, выполнение которых должна обеспечивать синтезируемая ИСУ. При этом данное множество можно представить в виде иерархической структуры подчинения целей, т.е. разбить его на n подмножеств $\Sigma_j, j = \overline{1, n}$ целей подсистем приводов и подмножество целей Σ_N механической подсистемы. В частности, для подсистем приводов одной из составляющих подмножества целей будет развитие соответствующим приводом требуемого значения момента $m_j = m_j^0$, а для механической подсистемы выражается в отработке требуемой траектории движения схвата МР в декартовом пространстве

$$\Sigma_N = \{X = \bar{X}(t), Y = \bar{Y}(t), Z = \bar{Z}(t)\}, \quad (14)$$

где $\bar{X}(t)$, $\bar{Y}(t)$, $\bar{Z}(t)$ – траекторные задания, поступающие от планировщика.

Для того чтобы синтезируемая система обеспечивала выполнение поставленных перед ней целей, она должна вырабатывать совокупность подмножеств решений для подсистем приводов $\Delta_j, j = \overline{1, n}$ и подмножество решений для механической подсистемы Δ_N . Таким образом, на каждом иерархическом уровне подмножеству целей Σ_j ИСУ ставит в соответствие подмножество решений Δ_j . Подмножества Σ_j и Δ_j разделяются на две группы, соответствующие определенному уровню сложности принятия решения, а сложная проблема принятия решений для выполнения множества целей разбивается на две группы последовательных более простых проблем с соответствующими

подмножествами целей и решений, так что решение более простых задач обеспечивает в совокупности решение исходного множества проблем.

На первом этапе синтеза задаются подмножества целей – инвариантов для подсистем НУ. В эти подмножества должны входить, в первую очередь, инварианты, обеспечивающие выполнение конечной задачи управления – технологические инварианты, а также инварианты, которые задают выполнение в синтезируемых ИСУ подобъектами $S_j, j = \overline{1, n}$ некоторых соотношений, при этом размерность подмножества Σ_j не может превышать размерность вектора управления μ_j соответствующей подсистемы $S_j, j = \overline{1, n}$. На основе сформированных подмножеств $\Sigma_j, j = \overline{1, n}$ вводится последовательно-параллельная совокупность инвариантных многообразий $\Psi^{(j)} = 0$, удовлетворяющих решению однородного векторного дифференциального уравнения

$$\dot{\Psi}^{(j)}(t) + \Lambda^{(j)}\Psi^{(j)} = 0, \quad (15)$$

где матрица $\Lambda^{(j)}$ такова, что решение $\Psi^{(j)} = 0$ уравнения (15) асимптотически устойчиво.

Используя стандартные процедуры синтеза методом АКАР, можно синтезировать регуляторы для подсистем НУ, обеспечивающие выполнение заданных совокупностей инвариантов.

При попадании ИТ подсистем $S_j, j = \overline{1, n}$ в окрестность пересечения соответствующей совокупности инвариантных многообразий $\Psi^{(j)} = 0$ поведение подобъектов будет описываться декомпозированными системами уравнений пониженной размерности – уравнениями «остаточной динамики»:

$$\begin{aligned} S_j : \dot{\hat{\mathbf{z}}}^{(j)}(t) &= \hat{\mathbf{R}}^{(j)}(\hat{\mathbf{z}}^{(j)}, \varphi^{(j)})\hat{\mathbf{z}}^{(j)} + \hat{\mathbf{S}}^{(j)}M_{cm}^{(j)}; \quad j = \overline{1, n}; \\ m_j &= \mathbf{d}^{(j)}(\hat{\mathbf{z}}^{(j)}, \varphi^{(j)})\hat{\mathbf{z}}^{(j)}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\varphi^{(j)}$ – задающее воздействие для j -й подсистемы.

Как отмечалось выше, отличительной особенностью предлагаемого подхода является то, что при синтезе регулятора ВУ учитывается остаточная динамика подсистем НУ, тогда с учетом (16) и приравняв $M_{cm}^{(j)} = P_j$ можно записать расширенную модель подсистемы ВУ

$$\begin{aligned} S_N : \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x} + \mathbf{H}(\mathbf{x})\varphi; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x})\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (17)$$

где \mathbf{x} – вектор состояния механической подсистемы ВС.

На этапе синтеза координирующего регулятора необходимо определить подмножество целей подсистемы ВУ (17), на основе которого формируется последовательно-параллельная совокупность инвариантных многообразий $\Psi^{(N)} = 0$, удовлетворяющая решению векторного функционального уравнения

$$\ddot{\Psi}^{(N)}(t) + \bar{\Lambda}^{(N)}\dot{\Psi}^{(N)}(t) + \Lambda^{(N)}\Psi^{(N)} = 0. \quad (18)$$

Таким образом, в результате синтеза ИСУ находятся наборы локальных уравнений регуляторов–исполнителей

$$\mathbf{u}^{(j)} = \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{z}^{(j)}, \varphi^{(j)}), \quad j = \overline{1, n}, \quad (19)$$

вырабатывающих совокупность подмножеств решений $\Delta_j, j = \overline{1, n}$ и обеспечивающих выполнение совокупности подмножеств целей $\Sigma_j, j = \overline{1, \dots n}$. Кроме того, формируется также координирующий регулятор

$$\varphi = \varphi(\mathbf{x}), \quad (20)$$

который вырабатывает подмножество решений Δ_N , обеспечивающих выполнение подмножества целей Σ_N .

Аналогичным образом, с использованием процедур метода АКАДР, представляется и процедура синтеза иерархических стратегий управления МР для дискретно-непрерывных ИСУ.

5. Пример синергетического синтеза ИСУ МР

В качестве примера рассмотрим ИСУ трехзвенным МР UMS-2 с исполнительными асинхронными электроприводами (АЭП). Математическая модель механической части (12) записывается в следующем виде [29]:

$$S^N : P_j = h_j \ddot{q}_j(t) + \eta_j, \quad j = 1, 3 \quad (21)$$

$$\text{где } h_1 = J_{z1} + J_{z2} + J_{z3} + m_3(q_3 + l_3)^2; \quad \eta_1 = 2m_3(q_3 + l_3)\dot{q}_1(t)\dot{q}_3(t); \quad h_2 = m_2 + m_3; \quad h_3 = m_3;$$

$$\eta_2 = (m_2 + m_3)g; \quad \eta_3 = -m_3(q_3 + l_3)(\dot{q}_1(t))^2, \quad \text{с параметрами: } m_2 = 7 \text{ кг; } m_3 = 5,6 \text{ кг; } l_3 = 0,45 \text{ м;}$$

$$J_{z1} = 0,029 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \quad J_{z2} = 0,055 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \quad J_{z3} = 0,32 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Математическая модель асинхронного двигателя j -й подсистемы имеет форму

$$\begin{aligned} \frac{di_{sx}^{(j)}}{dt} &= -\gamma_2^{(j)} i_{sx}^{(j)} + \frac{dq_j}{dt} i_{sy}^{(j)} K^{(j)} p^{(j)} + \gamma_3^{(j)} \frac{(i_{sy}^{(j)})^2}{\Psi_r^{(j)}} + \frac{\gamma_3^{(j)}}{\gamma_1^{(j)}} \Psi_r^{(j)} + \frac{L_r^{(j)}}{\gamma_1^{(j)}} u_{sx}^{(j)}; \\ \frac{di_{sy}^{(j)}}{dt} &= -\gamma_2^{(j)} i_{sy}^{(j)} - \frac{dq_j}{dt} i_{sx}^{(j)} K^{(j)} p^{(j)} - \gamma_3^{(j)} \frac{i_{sx}^{(j)} i_{sy}^{(j)}}{\Psi_r^{(j)}} - \gamma_4^{(j)} \frac{dq_j}{dt} \Psi_r^{(j)} + \frac{L_r^{(j)}}{\gamma_1^{(j)}} u_{sy}^{(j)}; \\ \frac{d\Psi_r^{(j)}}{dt} &= \gamma_3^{(j)} i_{sx}^{(j)} - \frac{r_r^{(j)}}{L_r^{(j)}} \Psi_r^{(j)}; \\ J^{(j)} \frac{d^2 q_j}{dt^2} &= \gamma_5^{(j)} \Psi_r^{(j)} i_{sy}^{(j)} - \alpha^{(j)} \frac{dq_j}{dt} - M_{cm}^{(j)}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{где } \gamma_1^{(j)} = L_s^{(j)} L_r^{(j)} - (L_m^{(j)})^2; \quad \gamma_2^{(j)} = \frac{r_r^{(j)} (L_m^{(j)})^2 + r_s^{(j)} (L_r^{(j)})^2}{L_r^{(j)} \gamma_1^{(j)}}; \quad \gamma_3^{(j)} = \frac{r_r^{(j)} L_m^{(j)}}{L_r^{(j)}}; \quad \gamma_4^{(j)} = \frac{L_m^{(j)} K^{(j)} p^{(j)}}{\gamma_1^{(j)}};$$

$\gamma_5^{(j)} = \frac{3}{2} \frac{p^{(j)} K^{(j)} L_m^{(j)}}{L_r^{(j)}}$; $\alpha^{(j)}$ – коэффициент вязкого трения; $K^{(j)}$ – коэффициент преобразования вращательного движения в поступательное; $L_r^{(j)}$, $L_s^{(j)}$ – индуктивности обмоток ротора и статора; $L_m^{(j)}$ – взаимная индуктивность обмоток; $r_r^{(j)}$, $r_s^{(j)}$ – сопротивления обмоток ротора и статора; $p^{(j)}$ – число пар полюсов; $J^{(j)}$ – момент инерции.

Рассмотрим задачу синтеза иерархической совокупности агрегированных регуляторов для нелинейного многомерного объекта, динамика которого описывается уравнениями (21), (22). Применение разработанной процедуры синтеза позволяет синтезировать набор локальных регуляторов подсистем приводов [30]

$$\begin{aligned} u_{sx}^{(j)} &= -c_1^{(j)} i_{sx}^{(j)} - c_2^{(j)} \frac{(i_{sy}^{(j)})^2}{\Psi_r^{(j)}} - c_3^{(j)} i_{sy}^{(j)} \frac{dq_j}{dt} + c_4^{(j)} (i_{sy}^{(j)} - \Phi_2^{(j)}) - c_5^{(j)} (\Psi_r^{(j)} - \Psi_0^{(j)}) - c_6^{(j)} \Psi_r^{(j)}; \\ u_{sy}^{(j)} &= -c_7^{(j)} i_{sy}^{(j)} - c_2^{(j)} \frac{i_{sy}^{(j)} i_{sx}^{(j)}}{\Psi_r^{(j)}} + c_3^{(j)} i_{sx}^{(j)} \frac{dq_j}{dt} - c_8^{(j)} i_{sx}^{(j)} - c_9^{(j)} \Phi_2^{(j)} + c_{10}^{(j)} (\Psi_r^{(j)} - \Psi_0^{(j)}) + c_{11}^{(j)} \Psi_r^{(j)}, \end{aligned}$$

где $c_i^{(j)}$ – коэффициенты, зависящие от параметров электропривода и вводимых совокупностей многообразий. Векторные регуляторы подсистем получены из условия выполнения совокупности инвариантов $\Sigma_j = \{m_j = m_j^0, \Psi_r^{(j)} = \Psi_0^{(j)}\}$.

Для механической подсистемы были синтезированы:

- позиционный регулятор

$$\begin{aligned}\varphi_2^{(1)} &= \frac{1}{\Psi_0^{(1)} \gamma_5^{(1)} x_5} \left\{ \left[J_1 + m_3(x_5 + l_3)^2 \right] \lambda_1^{(N)} X_0 \cos x_1 + Y_0 \lambda_2^{(N)} \sin x_1 - x_2 x_5 (\bar{\lambda}_1^{(N)} - \bar{\lambda}_2^{(N)}) \sin^2 x_1 + \right. \\ &\quad \left. + (x_6 (\bar{\lambda}_1^{(N)} - \bar{\lambda}_2^{(N)}) + x_5 (\lambda_1^{(N)} - \lambda_2^{(N)})) \cos x_1 \sin x_1 + (x_5 \bar{\lambda}_1^{(N)} + 2x_6) x_2 \right] - x_5 x_2 (m_2 x_6 (x_5 + l_3) - \alpha^{(1)}) \right\}; \\ \varphi_2^{(2)} &= \frac{g(m_2 + m_3) - \alpha^{(2)} x_4 + J_2 (x_4 \bar{\lambda}_3^{(N)} + \lambda_3^{(N)} (x_3 - Z_0))}{J_2 \gamma_5^{(2)} \Psi_0^{(2)}}; \\ \varphi_2^{(3)} &= \frac{J_3}{\gamma_5^{(3)} \Psi_0^{(3)}} \left\{ \sin^2 x_1 (x_6 (\bar{\lambda}_1^{(N)} - \bar{\lambda}_2^{(N)}) + x_5 (\lambda_1^{(N)} - \lambda_2^{(N)})) + X_0 \lambda_1^{(N)} \sin x_1 - \right. \\ &\quad \left. - Y_0 \lambda_2^{(N)} \cos x_1 + x_5 x_2 (\bar{\lambda}_1^{(N)} - \bar{\lambda}_2^{(N)}) \cos x_1 \sin x_1 + x_2^2 \left(\frac{m_3}{J_3} (x_6 + l_3) - x_5 \right) + x_5 \lambda_2^{(N)} + x_6 \left(\bar{\lambda}_2^{(N)} - \frac{\alpha^{(3)}}{J_3} \right) \right\},\end{aligned}$$

обеспечивающий выполнение совокупности целей ВУ: $\Sigma_N = \{X = X_0, Y = Y_0, Z = Z_0\}$;

- траекторный регулятор

$$\begin{aligned}\varphi_2^{(1)} &= \frac{1}{x_5 \Psi_0^{(1)} \gamma_5^{(1)}} \left\{ \left[J_1 + m_3(l_3 + x_5)^2 \right] (z_1 \lambda_1^{(N)} + a_1 \bar{\lambda}_1^{(N)}) \cos x_1 + (z_2 \lambda_2^{(N)} + a_2 \bar{\lambda}_2^{(N)}) \sin x_1 + x_5 x_2 (\bar{\lambda}_2^{(N)} - \bar{\lambda}_1^{(N)}) \sin^2 x_1 + \right. \\ &\quad \left. + ((\bar{\lambda}_1^{(N)} - \bar{\lambda}_2^{(N)}) x_6 - (\lambda_1^{(N)} - \lambda_2^{(N)}) x_5) \cos x_1 \sin x_1 + (2x_6 + \bar{\lambda}_1^{(N)} x_5) \right] - x_2 x_5 (x_6 m_2 (l_3 + x_5) + \alpha^{(1)}) \right\}; \\ \varphi_2^{(2)} &= \frac{J_2}{\Psi_0^{(2)} \gamma_5^{(2)}} \left\{ \frac{g(m_2 + m_3) - \alpha^{(2)} x_4}{J_2} - \bar{\lambda}_3^{(N)} (a_3 - x_4) - \lambda_3^{(N)} (z_3 - x_3) \right\}; \\ \varphi_2^{(3)} &= \frac{J_3}{\Psi_0^{(3)} \gamma_5^{(3)}} \left\{ (x_5 (\lambda_1^{(N)} - \lambda_2^{(N)}) + x_6 (\bar{\lambda}_1^{(N)} - \bar{\lambda}_2^{(N)})) \sin^2 x_1 - x_2^2 x_5 + \lambda_2^{(N)} x_5 - (\bar{\lambda}_2^{(N)} a_2 + \lambda_2^{(N)} z_2) \cos x_1 + \right. \\ &\quad \left. + (\bar{\lambda}_1^{(N)} a_1 + \lambda_1^{(N)} z_1) \sin x_1 + \frac{m_3 x_2^2 (x_6 + l_3) - \alpha^{(3)} x_6}{J_3} + x_2 x_5 (\bar{\lambda}_1^{(N)} - \bar{\lambda}_2^{(N)}) \cos x_1 \sin x_1 + \bar{\lambda}_2^{(N)} x_6 \right\},\end{aligned}$$

для совокупности целей механической подсистемы: $\Sigma_N = \{X = z_1, Y = z_2, Z = z_3\}$, где z_1, z_2, z_3 – фазовые координаты планировщика траекторий в декартовом пространстве робота.

На рис. 7 и 8 представлены траектории движения схвата робота в декартовом пространстве при выполнении позиционной и траекторной задач.

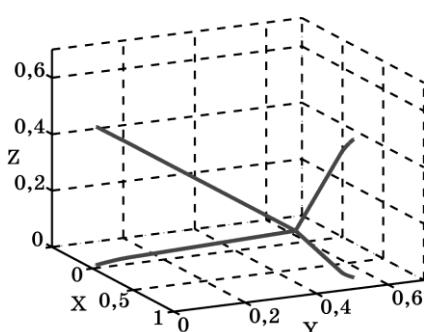


Рисунок 7 – Траектории движения схвата при позиционной задаче

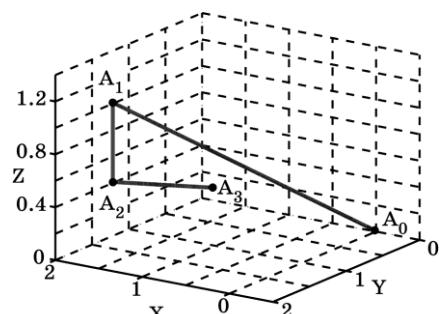


Рисунок 8 – Движение схвата робота по заданной траектории

Иерархическое управление группой роботов

Рассмотрим задачу группового управления четырехмоторными летательными аппаратами с вертикальным вектором тяги или квадрокоптерами. В настоящее время данный вид беспилотных летательных аппаратов применяются во многих сферах жизнедеятельности человека, в частности: в геодезии при построении карт высот местности [31], в полиции для фиксации нарушений и отслеживания преступников. Так как квадрокоптеры являются достаточно неустойчивыми

объектами управления [32], то основной проблемой, возникающей при создании групповой стратегии управления, является осуществление устойчивого передвижения группы роботов в заданную точку пространства. Данная задача является многомерной, так как включается в себя множество поведений мобильных роботов, а если учесть, что квадрокоптер является нелинейным объектом управления [32], то общая модель поведения группы роботов дополняется нелинейными составляющими динамики как самих МРГ, так и функциональных отношений между ними.

Для определения математической модели группы квадрокоптеров необходимо определить динамику поведения одного МРГ. Квадрокоптер (рис. 9) является разновидностью летательного аппарата с вертикальным вектором тяги [33, 34], приводящимся в движение четырьмя роторами со скоростью вращения $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$, закреплённых в центре масс робота M на двух пересекающихся крест-накрест металлических балках, врачающихся диагонально в противоположных направлениях (рис. 10).



Рисунок 9 – Внешний вид квадрокоптера

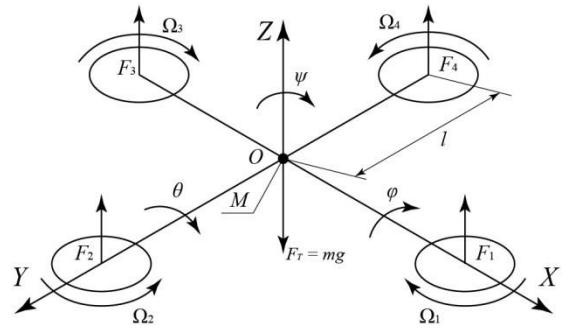


Рисунок 10 – Схема перемещения квадрокоптера в пространстве

Для синтеза стратегий управления верхнего уровня необходимо построить математическую модель квадрокоптера, рассматриваемого как твердое тело. Движение квадрокоптера можно считать суммой поступательного движения центра масс и сферического движения тела относительно центра масс [33, 34]. Предположим, что квадрокоптеры, входящие в состав группы, имеют одинаковую конструкцию и массо-инерционные характеристики, при этом центр масс каждого робота находится на пересечении балок, на которых закреплены винты. Режим движения группы квадрокоптеров будет описываться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}^k &= V_x^k; \quad \dot{y}^k = V_y^k; \quad \dot{z}^k = V_z^k; \\
 \dot{V}_x^k &= (\sin \psi^k \sin \varphi^k + \cos \psi^k \sin \theta^k \cos \varphi^k) U_1^k / m; \\
 \dot{V}_y^k &= (-\cos \psi^k \sin \varphi^k + \sin \psi^k \sin \theta^k \cos \varphi^k) U_1^k / m; \\
 \dot{V}_z^k &= \frac{U_1^k}{m} \cos \theta^k \cos \varphi^k - g; \\
 \dot{\theta}^k &= \omega_\theta^k; \quad \dot{\varphi}^k = \omega_\varphi^k; \quad \dot{\psi}^k = \omega_\psi^k; \\
 \dot{\omega}_\varphi^k &= \frac{(I_{yy} - I_{zz}) \omega_\theta^k \omega_\psi^k - J_{TP} \omega_\theta^k \Omega^k + U_2^k}{I_{xx}}; \\
 \dot{\omega}_\theta^k &= \frac{(I_{zz} - I_{xx}) \omega_\varphi^k \omega_\psi^k + J_{TP} \omega_\varphi^k \Omega^k + U_3^k}{I_{yy}}; \\
 \dot{\omega}_\psi^k &= \frac{(I_{xx} - I_{yy}) \omega_\varphi^k \omega_\theta^k + U_4^k}{I_{zz}}, \tag{23}
 \end{aligned}$$

где x^k, y^k, z^k – координаты центра масс k -го квадрокоптера группы; V_x^k, V_y^k, V_z^k – проекции вектора линейной скорости k -го робота; $\theta^k, \varphi^k, \psi^k$ – угол тангажа, угол крена и угол рыскания k -го

робота соответственно, ω_{θ^k} – угловая скорость тангажа k -го робота; ω_{ϕ^k} – угловая скорость крена k -го робота; ω_{ψ^k} – угловая скорость рыскания k -го робота; $U_1^k, U_2^k, U_3^k, U_4^k$ – каналы управления k -ым МРГ; Ω^k – общая скорость четырех винтов k -го робота; m – масса квадрокоптера; I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – моменты инерции вокруг оси X, Y и Z соответственно; J_{TP} – общий вращательный момент инерции вокруг оси винта. Уравнения связи каналов управления $U_1^k, U_2^k, U_3^k, U_4^k$ со скоростями вращения винтов $\Omega_1^k, \Omega_2^k, \Omega_3^k, \Omega_4^k$ имеют вид:

$$\begin{aligned}\Omega_1^k &= \sqrt{\frac{1}{4b} U_1^k - \frac{1}{2bl} U_3^k - \frac{1}{4d} U_4^k}; \\ \Omega_2^k &= \sqrt{\frac{1}{4b} U_1^k - \frac{1}{2bl} U_2^k + \frac{1}{4d} U_4^k}; \\ \Omega_3^k &= \sqrt{\frac{1}{4b} U_1^k + \frac{1}{2bl} U_3^k - \frac{1}{4d} U_4^k}; \\ \Omega_4^k &= \sqrt{\frac{1}{4b} U_1^k + \frac{1}{2bl} U_2^k + \frac{1}{4d} U_4^k}; \\ \Omega^k &= -\Omega_1^k + \Omega_2^k - \Omega_3^k + \Omega_4^k,\end{aligned}$$

где l – расстояние между центром квадрокоптера и центром пропеллера, b и d – аэродинамические составляющие тяги и коэффициента сопротивления соответственно.

В качестве основной задачи управления выберем асимптотически устойчивое передвижение группы квадрокоптеров в заданную позицию с удержанием заданного угла рыскания. Синтезированные стратегии управления являются задающими воздействиями для подсистем управления микродвигателями квадрокоптеров [33, 34]. Однако в рамках данной статьи синтез локальных законов управления подсистемами исполнительных механизмов квадрокоптера не рассматривается.

Управление группой квадрокоптеров является не тривиальной задачей, требующей, при использовании классических методов теории управления, применения процедуры линеаризации нелинейных составляющих, что неизбежно приводит к проблемам устойчивости всей системы. Поэтому для синтеза законов группового управления в данной работе предлагается использовать методы и подходы синергетической теории управления (СТУ). В СТУ совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов, которые выступают в роли цели управления, на них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи, а процедура синергетического синтеза сводится к поиску законов управления, при которых эти заданные инварианты выполняются. Следуя централизованному подходу группового управления в качестве первых инвариантов системы необходимо выбрать перемещение центра масс первого ($k = 1$) или ведущего МРГ в точку с заданными координатами x^*, y^*, z^* , а также задать удержание угла ориентации ψ^1 в заданном направлении ψ^* . Таким образом, подмножество целей для ведущего МРГ будет иметь вид:

$$\Sigma_1^1 = \left\{ x^1 = x^*, \quad y^1 = y^*, \quad z^1 = z^*, \quad \psi^1 = \psi^* \right\}. \quad (24)$$

В свою очередь ведомые МРГ ($k = 2, 3, \dots, n$, где n – количество МРГ) должны выполнять задачу следящей системы, поэтому подмножества целей управления ведомых МРГ будут иметь следующий вид:

$$\Sigma_1^k = \left\{ x^k = x^1 + \Delta_x^k, \quad y^k = y^1 + \Delta_y^k, \quad z^k = z^1 + \Delta_z^k, \quad \psi^k = \psi^1 + \Delta_\psi^k \right\}, \quad (25)$$

где $\Delta_x^k, \Delta_y^k, \Delta_z^k, \Delta_\psi^k$ – коэффициенты смещения ведомых МРГ относительно ведущего, k – номер ведомого МРГ.

Выразим определенные подмножества целей управления ведущего МРГ (24) через совокупности макропараметров:

$$\begin{aligned}
\Psi_1^1 &= V_x^1 - V_{x_{\max}}^1 \tanh(x^* - x^1); \\
\Psi_2^1 &= V_y^1 - V_{y_{\max}}^1 \tanh(y^* - y^1); \\
\Psi_3^1 &= V_z^1 - V_{z_{\max}}^1 \tanh(z^* - z^1); \\
\Psi_4^1 &= \omega_\theta^1 - k_1^1(\theta_1^* - \theta^1); \\
\Psi_5^1 &= \omega_\phi^1 - k_2^1(\varphi_1^* - \varphi^1); \\
\Psi_6^1 &= \omega_\psi^1 - k_3^1(\psi^* - \psi^1),
\end{aligned} \tag{26}$$

где $V_{\max}^1 = [V_{x_{\max}}^1, V_{y_{\max}}^1, V_{z_{\max}}^1]$ – вектор максимально допустимой скорости движения

ведущего МРГ, k_1^1, k_2^1, k_3^1 – положительные константы, θ_1^* и φ_1^* – желаемые значения углов тангенса и крена платформы ведущего квадрокоптера. При задании совокупности макропараметров (26) был применен иерархический подход к построению синергетических законов управления. Согласно данному подходу исходная задача разбивается на несколько иерархически связанных подзадач, в данном случае на задачу перемещения робота в пространстве и задачу стабилизации углов поворота платформы, от которой зависит выполнение первой. Система макропараметров (26) при этом должна удовлетворять решению $\Psi_i^1 = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) системы функциональных уравнений:

$$\dot{\Psi}_i^1 + \lambda_i^1 \Psi_i^1 = 0, \text{ при } i = \overline{1, 6}. \tag{27}$$

где $\lambda_i^1, i = \overline{1, 6}$ – положительные константы.

Из первых трех уравнений системы (27) определяется «внешний» закон управления ведущего МРГ U_1^1 и углы θ^1 и φ^1 , которые выступают в качестве целей для системы стабилизации платформы ведущего квадрокоптера $\Psi_4^1 = 0$ и $\Psi_5^1 = 0$:

$$\begin{aligned}
\theta^1 &= \theta_1^*; \\
\varphi^1 &= \varphi_1^*.
\end{aligned} \tag{28}$$

Из оставшихся уравнений системы (27) с учетом уравнений связи (28) и заданных макропараметров Ψ_4^1, Ψ_5^1 и Ψ_6^1 определяются «внешние» законы управления U_2^1, U_3^1, U_4^1 , отвечающие за повороты платформы ведущего МРГ при передвижении к заданной точке.

Далее, для осуществления слежения за ведущим МРГ, выразим подмножество целей управления ведомых МРГ (25) через следующие совокупности макропараметров:

$$\begin{aligned}
\Psi_1^k &= V_x^k - V_{x_{\max}}^k \tanh(x^1 + \Delta_x^k - x^k); \\
\Psi_2^k &= V_y^k - V_{y_{\max}}^k \tanh(y^1 + \Delta_y^k - y^k); \\
\Psi_3^k &= V_z^k - V_{z_{\max}}^k \tanh(z^1 + \Delta_z^k - z^k); \\
\Psi_4^k &= \omega_\theta^k - k_1^k(\theta_k^* - \theta^k); \\
\Psi_5^k &= \omega_\phi^k - k_2^k(\varphi_k^* - \varphi^k); \\
\Psi_6^k &= \omega_\psi^k - \omega_\psi^1 - k_3^k(\psi^1 + \Delta_\psi^k - \psi^k),
\end{aligned} \tag{29}$$

где $V_{\max}^k = [V_{x_{\max}}^k, V_{y_{\max}}^k, V_{z_{\max}}^k]$ – вектор максимально допустимой скорости движения ведомых МРГ, k_1^k, k_2^k, k_3^k – положительные константы, θ_k^* и φ_k^* – желаемые значения углов

поворота платформы k -го ведомого квадрокоптера. Согласно СТУ система макропеременных (29) должны удовлетворять решению $\Psi_i^k = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) системы функциональных уравнений:

$$\dot{\Psi}_i^k + \lambda_i^k \Psi_i^k = 0, \text{ при } i = \overline{1,6}. \quad (30)$$

Решением системы функциональных уравнений (30) с учетом уравнений связи

$$\theta^k = \theta_k^*;$$

$$\varphi^k = \varphi_k^*,$$

являются «внешние» законы управления ведомых МРГ $U_1^k, U_2^k, U_3^k, U_4^k$, которые обеспечивают перевод изображающей точки замкнутой системы в окрестность пересечения многообразий $\Psi_i^k = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 6$), в результате которого происходит динамическая декомпозиция исходной системы (1). В итоге поведение группы мобильных роботов на пересечении инвариантных многообразий $\Psi_i^1 = 0$ и $\Psi_i^k = 0$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) будет описываться следующей системой:

$$\begin{aligned} \dot{x}^1 &= V_{x_{\max}}^1 \tanh(x^* - x^1); & \dot{x}^k &= V_{x_{\max}}^k \tanh(x^1 + \Delta_x^k - x^k); \\ \dot{y}^1 &= V_{y_{\max}}^1 \tanh(y^* - y^1); & \dot{y}^k &= V_y^1 + V_{y_{\max}}^k \tanh(y^1 + \Delta_y^k - y^k); \\ \dot{z}^1 &= V_{z_{\max}}^1 \tanh(z^* - z^1); & \dot{z}^k &= V_z^1 + V_{z_{\max}}^k \tanh(z^1 + \Delta_z^k - z^k); \\ \dot{\theta}^1 &= k_1^1(\theta_1^* - \theta^1); & \dot{\theta}^k &= k_1^k(\theta_k^* - \theta^k); \\ \dot{\varphi}^1 &= k_2^1(\varphi_1^* - \varphi^1); & \dot{\varphi}^k &= k_2^k(\varphi_k^* - \varphi^k); \\ \dot{\psi}^1 &= k_3^1(\psi^* - \psi^1); & \dot{\psi}^k &= \omega_\psi^1 + k_3^k(\psi^1 + \Delta_\psi^k - \psi^k). \end{aligned} \quad (31)$$

Для того чтобы замкнутая система (31) была асимптотически устойчива необходимо чтобы $k_1^1 > 0, k_2^1 > 0, k_3^1 > 0, k_1^k > 0, k_2^k > 0, k_3^k > 0$ и проекции вектора максимально допустимой скорости движения для ведущего и ведомых МРГ вычислялись следующим образом:

$$\begin{aligned} X_1 &= x^* - x^1; & X_k &= x^1 + \Delta_x^k - x^k; \\ Y_1 &= y^* - y^1; & Y_k &= y^1 + \Delta_y^k - y^k; \\ Z_1 &= z^* - z^1; & Z_k &= z^1 + \Delta_z^k - z^k; \\ n_1 &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}; & n_k &= \sqrt{X_k^2 + Y_k^2 + Z_k^2}; \\ V_{x_{\max}}^1 &= \frac{\text{sign}(X_1)X_1V_0^1}{n_1}; & V_{x_{\max}}^k &= \frac{\text{sign}(X_k)X_kV_0^k}{n_k}; \\ V_{y_{\max}}^1 &= \frac{\text{sign}(Y_1)Y_1V_0^1}{n_1}; & V_{y_{\max}}^k &= \frac{\text{sign}(Y_k)Y_kV_0^k}{n_k}; \\ V_{z_{\max}}^1 &= \frac{\text{sign}(Z_1)Z_1V_0^1}{n_1}; & V_{z_{\max}}^k &= \frac{\text{sign}(Z_k)Z_kV_0^k}{n_k}, \end{aligned} \quad (32)$$

где V_0^1 и V_0^k – желаемая скорость перемещения ведущего и ведомого МРГ соответственно.

Таким образом, с учетом математической модели мобильного робота (23) и «внешних» управлений ведущего МРГ $U_1^1, U_2^1, U_3^1, U_4^1$ и ведомых МРГ $U_1^k, U_2^k, U_3^k, U_4^k$, можно получить стратегии группового управления реализующие централизованное

поведение, слаженное движение ведомых МРГ относительно главного ведущего МРГ, перемещающегося в заданную точку рабочего пространства.

На рис. 11 – 17 представлены переходные процессы изменения координат полученной замкнутой системы. Обозначения на рисунках: 1 – ведущий МРГ; 2, 3 – ведомые МРГ.

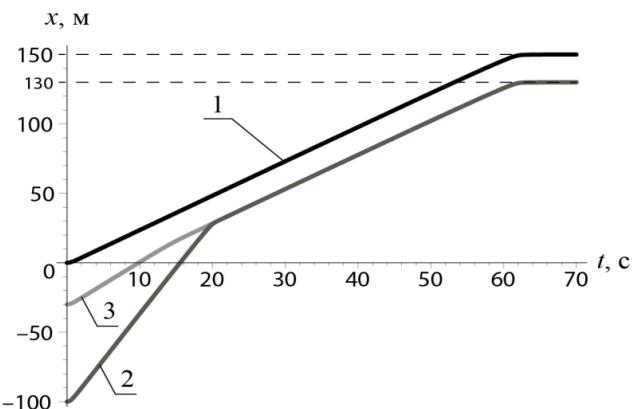


Рисунок 11 – Изменение проекции вектора перемещения роботов группы на ось X

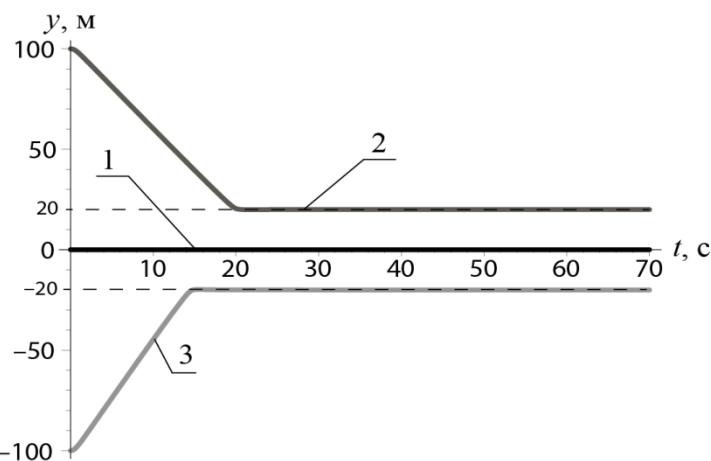


Рисунок 12 – Изменение проекции вектора перемещения роботов группы на ось Y

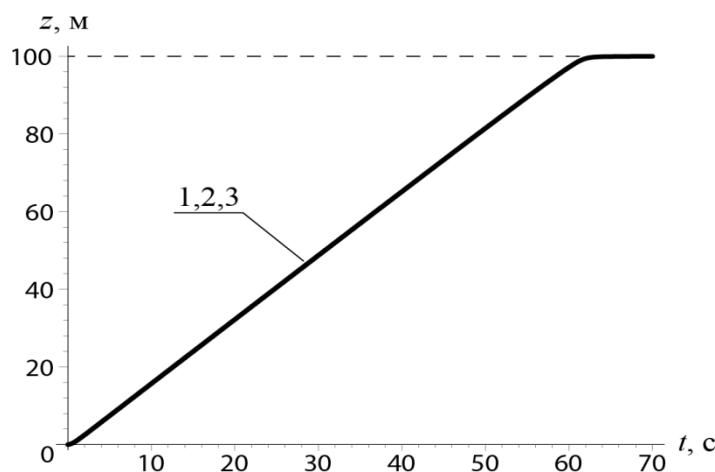


Рис. 13. Изменение проекции вектора перемещения роботов группы на ось Z

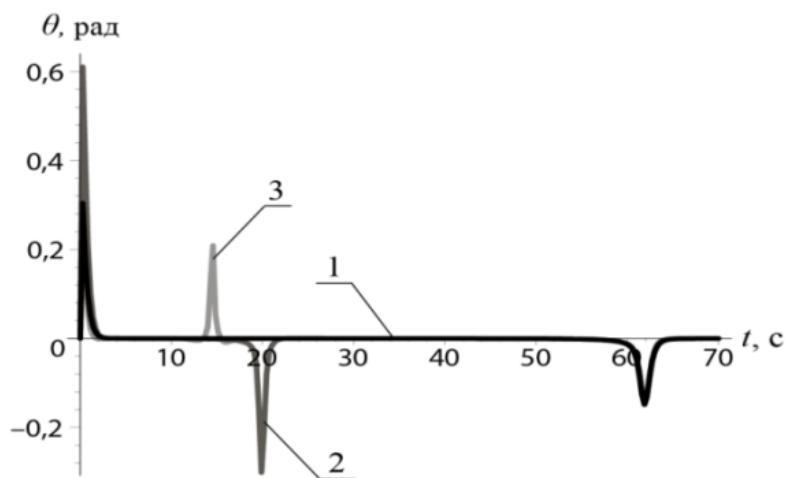


Рисунок 14 – Изменение угла тангажа роботов группы

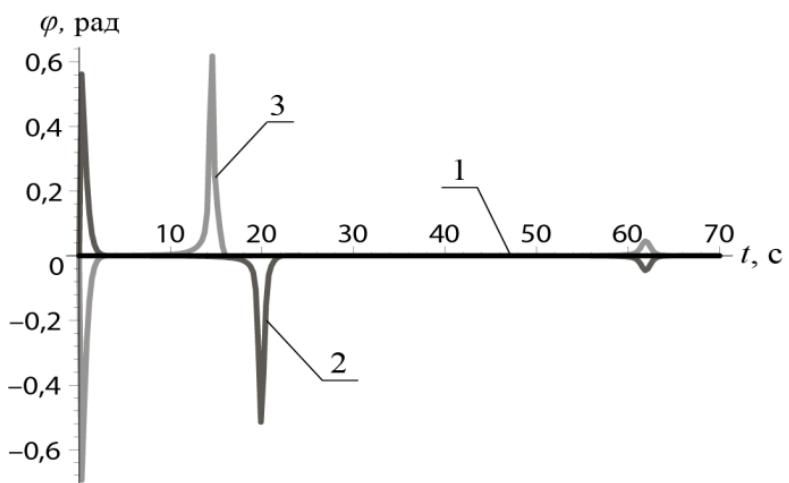


Рисунок 15 – Изменение угла крена роботов группы

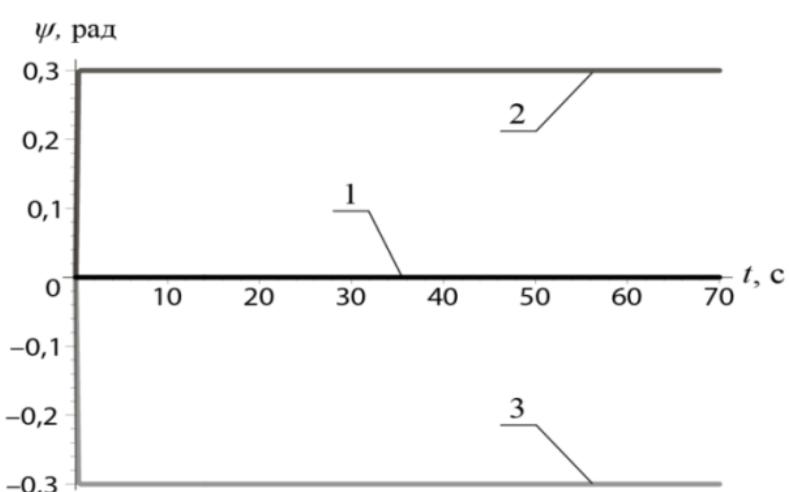


Рисунок 16 – Изменение угла рыскания роботов группы.

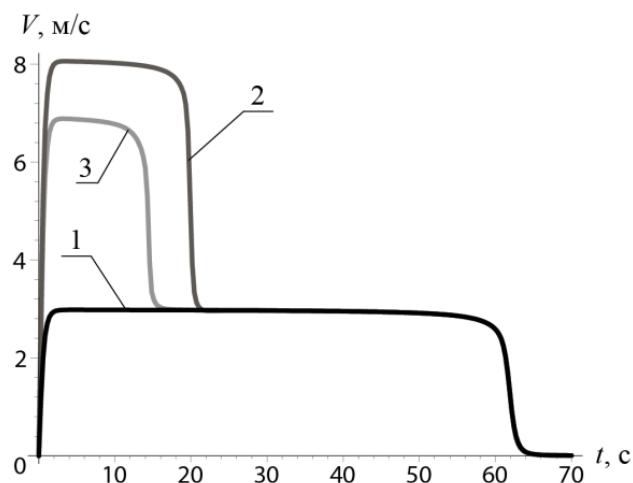


Рисунок 17 – Изменение вектора линейной скорости полета мобильных роботов группы.

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления группой роботов (26) – (32), с учетом (23) обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов: передвижение ведущего МРГ к заданной точке в трехмерном пространстве (рис. 11 – рис. 13), выдерживание ведомыми МРГ заданного смещения относительно ведущего МРГ (рис. 12 – рис. 13), а также выполнения всеми МРГ ограничения по максимальной скорости перемещения (рис. 17).

Заключение

Таким образом в статье рассмотрена проблема синтеза ИСУ сложными техническими системами. Предложен новый подход к синтезу иерархических структур управления многосвязными, многомерными, нелинейными динамическими системами, базирующийся на принципах и методах СТУ. Отличительная особенность предлагаемого подхода заключается в том, что, во-первых, применение синергетической идеологии позволяет провести естественную динамическую декомпозицию сложной нелинейной многосвязной системы на множество взаимодействующих подсистем; во-вторых, в результате синергетического синтеза каждая из подсистем (или групп подсистем) «погружается» на пересечение соответствующих локальных *аттракторов* – инвариантных многообразий, отражающих конкретное подмножество целей, а вся система в целом «погружается» в глобальный *аттрактор*, соответствующий исходному множеству целей; и, в-третьих, на более высоком уровне сложности принятия решений учитывается поведение подсистем, находящихся на нижних уровнях, в виде уравнений, описывающих их «остаточную динамику» – поведение на локальных аттракторах (инвариантных многообразиях). Эти особенности синергетического синтеза ИСУ позволяют избежать проблем, связанных с агрегированием информации и возникновения противоречий в принятии решений. В предлагаемом подходе степень агрегирования информации о процессах на каждом уровне иерархии определяется соответствующей совокупностью целей и уровнем абстрагирования моделей подсистем. Эта агрегированная информация отражается во вводимых макропараметрах. За счет того, что в математическую модель подсистемы более высокого уровня включена «остаточная динамика» подчиненных подсистем принятие решений регулятором вышестоящего уровня формируется с учетом динамика поведения нижележащих подсистем на введенных инвариантных многообразиях, тем самым, исключая возможность возникновения противоречий между подсистемами смежных уровней иерархии. Эффективность предложенного подхода продемонстрирована в применении к проблеме синтеза ИСУ робототехническими системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николис Дж. Динамика иерархических систем. –М.: Мир, 1989. – 488 с.
2. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. –М.: Мир, 1973. – 344 с.

3. Гермейер Ю.Б., Моисеев Н.Н. О некоторых задачах теории иерархических систем управления// Проблемы прикладной математики и механики. –М.: Наука, 1971. – С. 30–43.
4. Моисеев Н.Н. Избранные труды в 2-х томах. Т.1. Гидродинамика и механика. Оптимизация, исследование операций и теория управления. –М.: Тайдекс Ко, 2003. – 376 с.
5. Прангишвили И.В., Пащенко Ф.Ф., Бусыгин Б.П. Системные законы и закономерности в электродинамике, природе и обществе. –М.: Наука, 2001. – 525 с.
6. Шильяк Д. Децентрализованное управление сложными системами. – М.: Мир, 1994. – 576 с.
7. Цурков В.И. Декомпозиция в задачах большой размерности. –М.: Наука, 1981. – 352 с.
8. Елкин В.И. Редукция нелинейных управляемых систем: Дифференциально-геометрический подход. –М.: Наука, 1997. – 320 с.
9. Попков Ю.С. Теория макросистем (равновесные модели). –М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 320с.
10. Алиев Р.А., Либерзон М.И. Методы и алгоритмы координации в промышленных системах. –М.: Радио и связь, 1987. – 208 с.
11. Пятницкий Е.С. Синтез управления манипуляционными роботами на принципе декомпозиции// Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. –1987. –№3. –С. 92–99.
12. Пятницкий Е.С. Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. Ч. I, Ч. II// АиТ. –1989. –№1. –С. 87–99. –№2. –С. 57–71.
13. Матюхин В.И., Пятницкий Е.С. Управление движением манипуляционных роботов на принципе декомпозиции при учете динамики приводов// АиТ. –1989. –№9. –С. 67–81.
14. Красовский А.А. Декомпозиция и синтез субоптимальных адаптивных систем// Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. –1984. –№2. –С. 157–165.
15. Черноусько Ф.Л. Декомпозиция и синтез управления в динамических системах// Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. –1990. –№6. –С. 64–82.
16. Черноусько Ф.Л. Синтез управления нелинейной динамической системой// Прикладная математика и механика. –1992. –Т. 56. –Вып. 2. –С. 179–191.
17. Ананьевский И.М., Добринина И.С., Черноусько Ф.Л. Метод декомпозиции в задаче управления механической системой// Изв. РАН. ТиСУ. –1995. –№2. –С. 3–14
18. Крутько П.Д. Декомпозиции алгоритмы робастно устойчивых нелинейных многосвязных управляемых систем. Теория и прикладные задачи// Изв. РАН. ТиСУ. –2005. –№1. –С.5–31.
19. Крутько П.Д., Черноусько Ф.Л. Декомпозиции алгоритмы управления движением нелинейных динамических систем// Изв. РАН. ТиСУ. –2001. –№4. –С.8–24.
20. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. –М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
21. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. –М.:КомКнига, 2006. –240 с.
22. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ. Ч.III. 2000. – 656 с.
23. Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетический принцип иерархизации и аналитический синтез регуляторов взаимосвязанных электромеханических систем//Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Синергетика и проблемы управления». –2001. –№ 5. –С. 80 – 99.
24. Веселов Г.Е. Синергетический синтез иерархических взаимосвязанных робототехнических комплексов// Синергетика и проблемы теории управления/ Под ред. А.А. Колесникова. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. –С. 270 – 288.
25. Веселов Г.Е. Прикладная теория синергетического синтеза иерархических систем управления// Известия ТРТУ. Тематический выпуск. Прикладная синергетика и системный синтез. –2006. –№5. –С. 66–76.
26. Турчин В.Ф. Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции. –М.: Наука, 1993. – 295с.

27. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ. Ч.II. 2000. – 559 с.
28. Веселов Г.Е. Аналитическое конструирование агрегированных дискретных регуляторов// Синтез алгоритмов сложных систем. Сборник научных трудов. –Таганрог: ТРТУ. –1997. –Вып. 9. – С. 122–134.
29. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами. –М.: Мир, 1989. –376 с.
30. Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетическое управление нелинейными электроприводами III. Векторное управление асинхронными электроприводами// Электромеханика. –2006. –№ 2. – С. 25 – 36.
31. Agnew, M.S. Cluster space control of aerial robots/ M.S. Agnew, P. Dal Canto, C.A. Kitts, S. Li // Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010 IEEE/ASME International Conference. –2010. –P. 1305-1310.
32. Bresciani, T. Modeling, identification and control of a quadrotor helicopter: Master thesis. – Lund, 2008. – 170 p.
33. Веселов, Г. Е., Скляров А. А., Скляров С. А. Синергетический подход к управлению беспилотным летательным аппаратом//Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. №5. –С. 65–70.
34. Скляров, С.А. Синергетическое управление группой мобильных роботов// Известия ЮФУ. Технические науки. –2014. № 8(157). –С. 147-158.

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

Аннотация. В работе были рассмотрены математические модели объектов – двигателя внутреннего сгорания (ДВС), синхронного электродвигателя с постоянными магнитами и синхронного генератора. Путем объединения исходных моделей, была получена математическая модель гибридной силовой установки. Был синтезирован закон управления для математической модели гибридной силовой установки методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). В регуляторе были учтены неизвестные внешние возмущения, которые компенсировались с использованием принципа интегральной адаптации.

Ключевые слова: Гибридная силовая установка, двигатель внутреннего сгорания, синхронный электродвигатель, синхронный генератор, метод АКАР, синтез регулятора, система управления, математическая модель.

Annotation. In this paper were considered mathematical models of objects – an internal combustion engine (ICE), a synchronous electric motor with permanent magnets and a synchronous generator. Was obtain a mathematical model of a hybrid power plant by combining the original models. A control law for the mathematical model of a hybrid power plant synthesized by the method of analytical design of aggregated regulators (ADAR). In the regulator, unknown external disturbances were takes into account, which were compensate by the principle of integral adaptation.

Keywords: Hybrid power plant, internal combustion engine, synchronous electric motor, synchronous generator, method ADAR, synthesis of regulator, control system, mathematical model.

Комбинированные двигатели внутреннего сгорания имеют обширную область применения и являются основой как коммерческого транспорта – дизели, так и транспортных средств – бензиновые двигатели. Требования к экономичности, мощности и экологическим показателям двигателей ужесточаются. Есть несколько направлений развития современного автомобилестроения, первое – это совершенствование двигателей внутреннего сгорания [1–4] и второе – работа автомобиля, полностью или частично, на электродвигателе [5–7].

До сих пор электромобили не могут конкурировать с автомобилями, работающими на двигателе внутреннего сгорания (ДВС). Несмотря на очевидные плюсы электродвигателя перед ДВС – чистота и бесшумность, они имеют ряд серьезных недостатков, по сравнению с ДВС – более высокая стоимость (из-за аккумуляторных батарей), более низкая мощность (один килограмм топлива дает больше мощности, чем один килограмм аккумуляторной батареи), ограниченный пробег между подзарядками батареи и длительное время их зарядки.

Поэтому на передний план выходят автомобили с гибридной силовой установкой [8, 9]. Отличительной особенностью гибридной силовой установки является использование двух и более источников энергии и соответствующим им двигателей, преобразующих энергию в механическую работу. Несмотря на многообразие источников энергии (тепловая энергия бензина или дизельного топлива, электроэнергия, энергия сжатого воздуха, энергия сжатого сжиженного газа, солнечная энергия, энергия ветра и др.) в промышленном масштабе на гибридных автомобилях используется комбинация двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя. Главное преимущество гибридного автомобиля заключается в существенном сокращении расхода топлива и выбросов вредных веществ в атмосферу, которое достигается путем использования электродвигателя, а также в сохранении необходимой мощности и подзарядки аккумуляторных батарей, с помощью ДВС.

Гибридная силовая установка состоит из трех основных элементов: ДВС, большой электродвигатель и малый электродвигатель, который в основном работает в генераторном режиме.

Три перечисленных двигателя соединены планетарным редуктором, который распределяет крутящие моменты между двигателями и колесами автомобиля.

Для получения математической модели гибридной силовой установки необходимы математические модели ДВС, электродвигателя и генератора.

Математическая модель ДВС представляет собой три уравнения, описывающих динамику объекта [10].

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= y_2 / J - b_{12}M_l, \\ \dot{x}_2 &= -a_2x_2 + b_2u_1, \\ \dot{x}_3 &= -a_3x_1x_3 + b_3\varphi_1(x_3)\varphi_2(u_2),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x_1 = \omega$ – скорость вращения коленчатого вала;

$x_2 = \mu_{ff}$ – поток массы топливной пленки;

$x_3 = P$ – давление во впускном коллекторе;

$u_1 = \mu_{fi}$ – количество впрыснутого в цилиндр топлива;

$u_2 = \alpha$ – угол поворота дроссельной заслонки;

$u_3 = \alpha_{ign}$ – угол опережения зажигания;

$y_1 = (c_1x_2 + d_1u_1) / x_1x_3 = \phi$ – соотношение воздух–топливо;

$y_2 = c_2x_3\varphi_3\varphi_4 - c_{f0} - c_{f1}x_1 - c_{f2}x_1^2 = M$ – эффективный момент;

M_l – момент внешней нагрузки.

Неизвестные функции (2): $\varphi_1(x_3)$ – поток воздуха, проходящий через единицу площади, $\varphi_2(u_2)$ – площадь открываемого дроссельной заслонкой отверстия, $\varphi_3(y_1), \varphi_4(x_1, u_3)$ – статические функции, получаемые экспериментально.

$$\begin{aligned}\varphi_1(x_3) &= \frac{P_a}{\sqrt{RT_a}} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}, \\ \varphi_2(u_2) &\approx \frac{\pi D^2}{4} \left(1 - \frac{\cos(u_2)}{\cos(\alpha_0)}\right), \\ \varphi_3(y_1) &= -1,2837y_1^2 + 2,2664y_1, \\ \varphi_4(x_1, u_3) &= (-4,6434 \times 10^{-4}u_3^2 + 0,0431u_2) \times (1 - 0,5 \exp(-0,0079x_1)).\end{aligned}$$

Математическая модель электродвигателя [11] представляет собой три уравнения, описывающих динамику синхронного электродвигателя с постоянными магнитами.

$$\begin{aligned}\dot{x}_4 &= -\frac{R_s}{L_d}x_4 + n_p x_6 x_5 + \frac{u_{led}}{L_d}, \\ \dot{x}_5 &= -n_p x_6 x_4 - \frac{R_s}{L_q}x_5 - n_p \frac{psi_f}{L_q}x_6 + u_{2ed} / L_q, \\ \dot{x}_6 &= \frac{(1.5n_p psi_f x_5 - Bx_6)}{J_e},\end{aligned}\quad (2)$$

где $x_4 = i_d$ – проекция тока статора на ось d;

$x_5 = i_q$ – проекция тока статора на ось q;

$x_6 = \omega$ – угловая скорость вращения ротора;
 $u_{1ed} = u_d$ – проекция напряжения статора на ось d;
 $u_{2ed} = u_q$ – проекция напряжения статора на ось q;
 $M_{ed} = 1,5n_p \psi_f i_q - B\omega$ – эффективный момент.

Математическая модель синхронного генератора представляет собой четыре уравнения, описывающих динамику объекта.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_7 &= \frac{u_{1eg} - k_n x_{10} x_9 + (L_{dg} - L_{qg}) x_8 x_9}{J_g}, \\
 \dot{x}_8 &= -\frac{-x_8 R_{eg} - rx_8 + x_7 L_{qg} x_9 + k_n \frac{(u_{2eg} - r_b x_{10})}{L_b}}{L_{dg} (1 - \frac{k_n^2}{L_{dg} L_b})}, \\
 \dot{x}_9 &= \frac{-x_9 R_{eg} - x_7 L_{dg} x_8 - rx_9 + k_n x_7 x_{10}}{L_{qg}}, \\
 \dot{x}_{10} &= \frac{-x_8 R_{eg} - rx_8 + x_7 L_{qg} x_9 + k_n \frac{u_{2eg} - r_b x_{10}}{L_b}}{L_{dg} (1 - \frac{k_n^2}{L_{dg} L_b}) L_b} - \frac{r_b x_{10}}{L_b}, \\
 \dot{x}_{11} &= x_7,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $x_7 = \omega$ – угловая скорость вращения ротора;
 $x_8 = i_d$ – проекция тока статора на ось d;
 $x_9 = i_q$ – проекция тока статора на ось q;
 $x_{10} = i_b$ – ток возбуждения;
 $x_{11} = \theta$ – угол поворота ротора;
 $u_{1eg} = M_D$ – механический момент;
 $u_{2eg} = U_b$ – напряжение обмотки возбуждения.

Математическая модель гибридной силовой установки получается путем объединения моделей (1), (2), (3) и дополняется двумя уравнениями z и z1 динамической модели возмущения, действующего на ДВС и электродвигатель, и зависящего от скорости движения автомобиля.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \frac{(y_2 - M_l W_k)}{J}, \\
\dot{x}_2 &= -a_2 x_2 + b_2 u_1, \\
\dot{x}_3 &= -a_3 x_1 x_3 + b_3 \varphi_1(x_3) \varphi_2(u_2), \\
\dot{z} &= \eta(x_1 - x_1^*), \\
\dot{x}_4 &= -\frac{R_s}{L_d} x_4 + n_p x_6 x_5 + \frac{u_{led}}{L_d}, \\
\dot{x}_5 &= -n_p x_6 x_4 - \frac{R_s}{L_q} x_5 - n_p \frac{psif}{L_q} x_6 + u_{2ed} / L_q, \\
\dot{x}_6 &= \frac{(1.5n_p psif x_5 - B x_6 - M_l W_k)}{J_e}, \\
\dot{z}_1 &= \eta(x_6 - x_6^*), \\
\dot{x}_7 &= \frac{u_{1eg} - k_n x_{10} x_9 + (L_{dg} - L_{qg}) x_8 x_9}{J_g}, \\
&\quad - x_8 R_{eg} - r x_8 + x_7 L_{qg} x_9 + k_n \frac{(u_{2eg} - r_b x_{10})}{L_b} \\
\dot{x}_8 &= \frac{-x_8 R_{eg} - x_7 L_{dg} x_8 - r x_9 + k_n x_7 x_{10}}{L_{dg}(1 - \frac{k_n^2}{L_{dg} L_b})}, \\
\dot{x}_9 &= \frac{-x_9 R_{eg} - x_7 L_{dg} x_8 - r x_9 + k_n x_7 x_{10}}{L_{qg}}, \\
\dot{x}_{10} &= \frac{-x_8 R_{eg} - x_7 L_{qg} x_9 + k_n \frac{u_{2eg} - r_b x_{10}}{L_b}}{L_{dg}(1 - \frac{k_n^2}{L_{dg} L_b})} - \frac{r_b x_{10}}{L_b}, \\
\dot{x}_{11} &= x_7,
\end{aligned}$$

Механический момент, поступающий на генератор равен 28% от общего момента,

$u_{1eg} = 0,28(\frac{1}{3}y_2 + \frac{1}{2}M_{ed})$, где y_2 – эффективный момент ДВС и электродвигателем – M_{ed} – эффективный момент электродвигателя, 72% общего момента передается на колеса автомобиля. $W_k = (\frac{x_1 + 0,65x_6}{k_p k_r})$ – скорость движения автомобиля, $k_p = 2$ – коэффициент редукции планетарной передачи, $k_r = 3$ – коэффициент редукции цепной передачи.

Синтез регулятора проводился методом АКАР [12, 13]. Система управления выполняла следующие цели: на малых скоростях автомобиля работает электродвигатель (рис. 1), затем подключается ДВС (рис. 2), при этом электродвигатель некоторое время помогает ДВС разгонять

автомобиль, а затем останавливается. Также представлены графики скорости движения автомобиля (рис. 3), эффективных моментов ДВС, электродвигателя и автомобиля (рис. 4) и механического момента, поступающего на генератор (рис. 5).

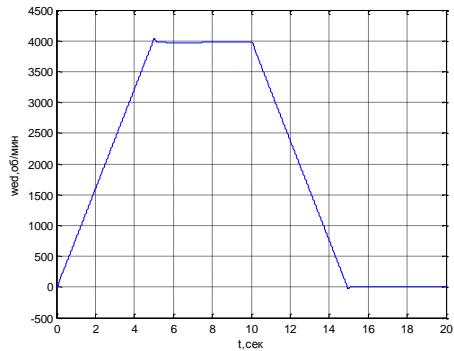


Рисунок 1 – График скорости вращения ротора электродвигателя

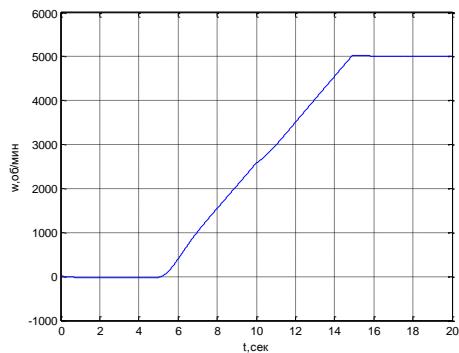


Рисунок 2 – График скорости вращения ДВС

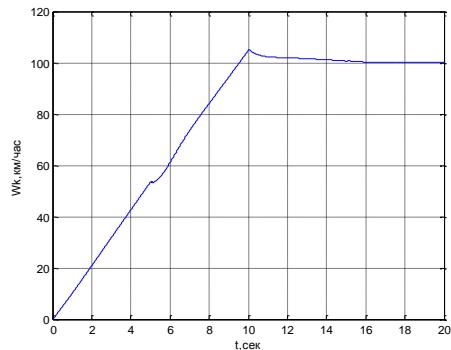


Рисунок 3 – График скорости движения автомобиля

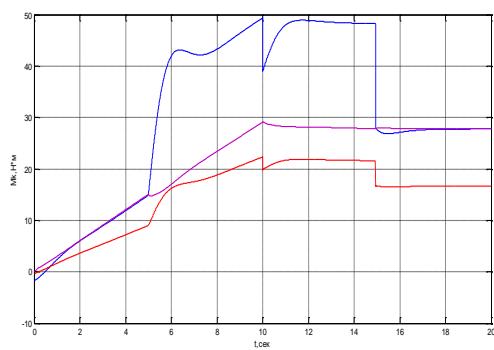


Рисунок 4 – График эффективных моментов ДВС, электродвигателя и автомобиля

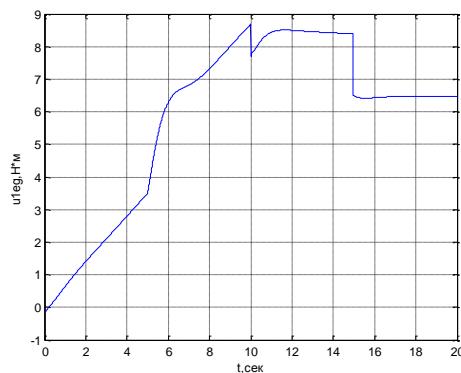


Рисунок 5 – График механического момента генератора

По графикам видно, что цели синтеза выполняются.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшей работы с математической моделью гибридной силовой установки и показывают применимость метода АКАР для синтеза любых сложных нелинейных систем с возможностью векторного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луканин, В.Н. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Ханиян [и др.]; под ред. В.Н. Луканина // В 3-х кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 400 с.
2. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов [Текст] / А.И. Колчин. – М.: Высш. шк., 2003. – 496 с.
3. Вырубов, Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей [Текст]: учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин [и др.], под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
- 4 . Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals [Text] / J.B. Heywood. – N.Y.: McGraw–Hill International Editions, 1988. – 930 с.
5. Пятибратьев, Г.Я. Моделирование электромеханических систем [Текст]: учебное пособие / Г.Я. Пятибратьев, Д.В. Барыльник. – Новочеркасск: ЮРГПУ, 2013. – 103 с.
6. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст] / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО, 2008. – 298 с.
7. Ключев, В.И. Теория электропривода [Текст] / В.И. Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
8. Баженов, О.В. Гибридные автомобили [Текст] / О.В. Баженов, О.П. Смирнов, С.А. Сериков [и др.]. – Харьков: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
9. Сериков, С.А. Синтез системы управления силовой установкой гибридного автомобиля [Текст] / С.А. Сериков // Вестник ХНАДУ. – 2007. – Вып. 36.
10. Герасимов, Д.Н. Инжекторный двигатель как объект управления [Текст] / Д.Н. Герасимов, Х. Джавахериан, Д.В. Ефимов, В.О. Никифоров // Системы управления движущимися объектами. – Спб.: Известия РАН, 2010. – №5. – С. 135–147.
11. Qiang, S. Robust Speed Controller Design for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Based on Sliding Mode Control [Text] / S. Qiang, J. Chao // Energy Procedia. – 2016. – №88. – Pp. 867–873.
12. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза [Текст] / А.А. Колесников. – М: Едиториал УРСС / КомКнига, 2012. – 240 с.
13. Колесников, А.А. Синергетическая теория управления [Текст] / А.А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

Кузьменко Андрей Александрович

Южный федеральный университет

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Аннотация. Работа иллюстрирует применение синергетической теории управления для построения робастных законов управления нелинейными техническими системами. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является использование принципа интегральной адаптации высокого порядка, когда влияние параметрических и внешних возмущений компенсируется за счёт синтезированных нелинейных законов управления с особым образом введёнными интеграторами (не менее трёх). Данный подход для компенсации возмущений не требует синтеза наблюдателей состояния и возмущений и, соответственно, оперативной оценки этих возмущений.

Ключевые слова: нелинейное управление, робастное управление, синергетическая теория управления, инвариант, интегральная адаптация, скользящее управление.

Annotation. The work demonstrates the application of the synergetic control theory for design of robust control laws for nonlinear engineering systems. A distinctive feature of the proposed approach is the use of the principle of integral adaptation of high order, when the influence of parametric and external disturbances is compensated for by design of nonlinear control laws with specially introduced integrators (at least three ones). This approach for disturbance compensation does not require to design of state and disturbance observers and consequently eliminates a real-time estimation of these disturbances.

Keywords: nonlinear control, robust control, synergetic control theory, invariant, integral adaptation, sliding mode control.

Введение

В мировой и отечественной научной литературе проблеме нелинейного управления техническими системами посвящены сотни монографий и тысячи статей и докладов. Характерной чертой таких систем является их структурная и параметрическая неопределённость. Наиболее распространёнными методами преодоления таких неопределённостей являются методы адаптивного и робастного управления [1–3]. В настоящее время адаптивность и робастность систем управления преимущественно обеспечивается за счёт совместного использования традиционных линейных методов адаптивного и робастного управления и методов теории нечётких систем управления и искусственных нейронных сетей, использование скользящих режимов для обеспечения робастности к возмущениям и др.

Принципиально иным направлением нелинейного управления техническими системами является синергетическая теория управления (СТУ) [4, 5], которая нашла обширное применение в различных областях современной техники – авиации, электромеханике, энергетике и др. Основные особенности СТУ применительно к проблеме синтеза нелинейных законов управления сложными техническими объектами состоят: во-первых, в кардинальном изменении целей поведения синтезируемых систем; во-вторых, в непосредственном учёте естественных свойств нелинейных объектов; в-третьих, в формировании нового механизма генерации обратных связей, т.е. законов управления. В СТУ имеется два способа обеспечения робастности нелинейной системы к внешним и параметрическим возмущениям. Первый способ – это использование принципа интегральной адаптации СТУ [5–7], который заключается во введении в закон управления нелинейных интеграторов, компенсирующих возмущения без их оперативной оценки. При этом необходима минимальная информация о возмущении – его класс (кусочно-постоянное, полиномиальное, гармоническое и т.д.), который можно представить динамической моделью в виде системы дифференциальных уравнений. Построение систем управления, опирающихся на принцип интегральной адаптации, не требует синтеза наблюдателей состояния и возмущений и,

соответственно, оперативной оценки этих возмущений. Второй способ – построение нелинейных наблюдателей параметрических и/или внешних возмущений [4, 5, 8–10]. В этом случае синтезируемые нелинейные законы управления дополняются подсистемой наблюдения, осуществляющей динамическую оценку неизмеряемых возмущений и их компенсацию. Необходимо также отметить, что на основе наблюдателей в СТУ можно построить и такие наблюдатели, которые динамически идентифицируют неизмеряемые переменные состояния объекта по измеряемым переменным состояния и номинальным параметрам. Оба способа достаточно formalизованы и опираются на метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) СТУ. Сравнение метода АКАР с методами современной теории управления представлены в [10–12].

Целью данной работы является иллюстрация применения СТУ для построения робастных законов управления нелинейными техническими системами с использованием первого способа.

1. Описание предлагаемого подхода

Принцип интегральной адаптации заключается в построении «гарантирующих регуляторов», обеспечивающих компенсацию наихудших возмущений, т.е. «... возмущений, которые за наименьшее время отклоняют объект управления на максимальное возможное расстояние от желаемого состояния в его фазовом пространстве» [5]. Указанное определение означает, что наихудшие возмущения – это кусочно-постоянные возмущения вида $M_i^{\text{sup}}(t) = M_{i0} \text{sign } \mu(t)$ со случайным изменением величины $M_{i0} = \text{const}$ на соответствующем интервале и знака функции $\mu(t)$. Для компенсации кусочно-постоянных возмущений «гарантирующий регулятор» должен включать в себя интегратор [5], т.е. реализовывать астатический закон управления. В классической теории управления интегральные составляющие, с одной стороны, компенсируют постоянные возмущения и повышают точность управления, а с другой – ухудшают устойчивость замкнутой системы. Но для методов СТУ такой проблемы не существует, так как процедура этого метода гарантирует асимптотическую устойчивость системы дифференциальных уравнений сложных технических объектов. Использование принципа интегральной адаптации СТУ позволяет полностью компенсировать влияние полиномиального возмущения степени n : для этого особым образом вводится $n+1$ интегратор. Очевидно, что гармоническое возмущение таким образом полностью не компенсируется, но существенно ослабляется влияние данного возмущения уже с тремя интеграторами, что, собственно и демонстрирует данная работа.

В соответствии с идеологией метода АКАР для того, чтобы противодействовать внешним и параметрическим возмущениям мы должны представить каждое из них в виде динамической модели, выход которой аппроксимирует возмущение соответствующего класса. Таким образом, если рассматривать возмущение степени n , то такая модель имеет вид

$$\dot{z}_1(t) = z_2; \quad \dot{z}_2(t) = z_3;$$

.....

$$\dot{z}_n(t) = z_{n+1}; \quad \dot{z}_{n+1}(t) = \Phi_i(\mathbf{x}),$$

где z_i – динамические переменные модели возмущения, $\Phi_i(\mathbf{x})$ – функция от переменных состояния исходного объекта, отражающая желаемый инвариант.

В данной работе в качестве предлагаемого подхода предлагается строить не отдельную модель для каждого из возмущений, а строить одну модель для возмущения с максимальной степенью. Процедуру синтеза нелинейных законов управления покажем на приведённых ниже примерах.

2. Примеры синтеза синергетических законов управления

Пример 1. Рассмотрим применение предложенного подхода к решению задачи управления электроприводом (ЭП) сборочного робота с ангуллярными кинематическими схемами. В [13] подробно рассматривается задача управления такими роботами на основе технологии

ассоциативной памяти, в состав которой входит классификатор состояния объекта и формирователь управлений, необходимые для идентификации текущих параметров объекта и формирования вектора настраиваемых параметров закона управления. В [13] на основе методики нахождения уравнений Лагранжа второго рода представлена математическая модель ЭП. Опуская подробный вывод модели, приведём её конечный вид

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2; \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{k_m x_3 - M_c - J(t)x_2}{J(t)}; \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{u - k_e x_2 - Rx_3}{L},\end{aligned}\tag{1}$$

где x_1 – угол поворота вала ЭП, x_2 – скорость вращения вала ЭП, x_3 – ток в якорной цепи ЭП, u – управление, $J(t)$ – приведённый момент инерции ЭП, M_c – момент сопротивления, k_m, k_e, L, R – параметры ЭП.

Далее модель (1) будем рассматривать как модель по скорости вращения, т.е. будем опускать уравнение для угла поворота вала ЭП. Параметрическая неопределенность ЭП (1) возникает из-за изменения во времени приведённого момента инерции $J(t)$ и его производной $j(t)$. Действие же внешней среды определяется моментом сопротивления M_c . Основная технологическая задача объекта (1) – это поддержание желаемой скорости вращения ЭП робота, т.е. $x_2 = x_2^0 = const$ при наличии указанных возмущений. В [13] рассмотрены два варианта изменения приведённого момента инерции $J(t)$: в виде линейной функции времени $J_1 = J_0 + at$ и в виде гармонической функции $J_2 = b \sin \sigma_0 t$, а момент сопротивления $M_c = const$. В зависимости от выбранного варианта изменения моментов $J(t)$ и M_c на основе метода АКАР были синтезированы разные синергетические регуляторы, обеспечивающие компенсацию указанных параметрических и внешнего возмущений $M_c \neq 0$ [13]. При этом использовалось как построение наблюдателей возмущений, так и принцип интегральной адаптации. Но при применении этого принципа каждое из возмущений представлялось своей отдельной динамической моделью. В данной же работе для компенсации возмущений $J(t) = J_0 + at + b \sin \sigma_0 t$ и $M_c = const \neq 0$ рассмотрим более универсальный подход применения принципа интегральной адаптации – интегральную адаптацию высокого порядка с единой моделью возмущений.

Согласно методу АКАР сформируем расширенную модель для синтеза закона управления. Поскольку в модели (1) момент инерции $J(t)$ определяет только переходной режим ЭП и не влияет на стационарное состояние, то в расширенной модели представим его номинальным постоянным значением $J(t) = J_0$ и, соответственно, имеем тогда $j(t) = 0$. Возмущение M_c и фактическое влияние возмущения $j(t) \neq 0$ представим динамической моделью в виде последовательно включённых трёх интеграторов:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1(t) &= z_2; \\ \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \beta(x_2 - x_2^0),\end{aligned}\tag{2}$$

где $z_1 = \hat{M}_c$ – выходная переменная состояния системы (2), которая является динамической оценкой возмущений для системы (1), β – постоянный коэффициент.

Объединяя (1) и (2), получим расширенную систему:

$$\begin{aligned}\dot{x}_2(t) &= \frac{k_m x_3 - z_1}{J_0}; \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{u - k_e x_2 - Rx_3}{L}; \\ \dot{z}_1(t) &= z_2; \\ \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \beta(x_2 - x_2^0)\end{aligned}\tag{3}$$

Таким образом, модель (3) используется для синтеза синергетического закона управления $u = u(\mathbf{x}, \mathbf{z})$, которое обеспечивает выполнение технологического инварианта $x_2 = x_2^0 = const$ и компенсирует неизмеряемые возмущения $J(t) = J_0 + at + b \sin \sigma_0 t$ и $M_c = const \neq 0$, действующие на объект (1).

В соответствии с методом АКАР введём макропеременную вида

$$\psi = x_2 - x_2^0 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3 z_3,\tag{4}$$

здесь γ_i – постоянные коэффициенты.

Подставляя ψ (4) в основное функциональное уравнение метода АКАР

$$\ddot{\psi}(t) + \lambda_1 \dot{\psi}(t) + \lambda_2 \psi = 0\tag{5}$$

и решая его совместно с (3) и (4), находим закон управления:

$$\begin{aligned}u(\mathbf{x}, \mathbf{z}) &= k_e x_2 + Rx_3 + \frac{LJ_0}{k_m} \left[\frac{1}{J_0} (1 - \lambda_1 \gamma_1 J_0) z_2 - (\gamma_1 + \lambda_1 \gamma_2) z_3 - \right. \\ &\quad - \beta (\gamma_2 + \lambda_1 \gamma_3) (x_2 - x_2^0) - \frac{1}{J_0} (\gamma_3 \beta + \lambda_1) (k_m x_3 - z_1) - \\ &\quad \left. - \lambda_2 (x_2 - x_2^0 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3 z_3) \right].\end{aligned}\tag{6}$$

$$\lambda_j > 0, j = 1, 2$$

Отметим, что условием асимптотической устойчивости (5) является условие

. А выбором значений λ_j обеспечивается характер переходного движения к многообразиям $\psi = 0$ и $\dot{\psi}(t) = 0$.

На пересечении многообразий $\psi = 0$, $\dot{\psi}(t) = 0$ динамика системы (3) описывается следующей линейной декомпозированной системой:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1(t) &= z_2; \\ \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= \beta(-\gamma_1 z_1 - \gamma_2 z_2 - \gamma_3 z_3).\end{aligned}\tag{7}$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов, обеспечивающих устойчивость системы (7), воспользуемся методом модального управления. Запишем матрицу состояния системы (7) и найдём ее характеристическое уравнение:

$$A(p) = \det(pE - A) = p^3 + \beta\gamma_3 p^2 + \beta\gamma_2 p + \beta\gamma_1 = 0.$$

Желаемое характеристическое уравнение с заданным расположением корней представим в виде

$$A_0(p) = (p - p_0)^3 = p^3 - 3p_0 p^2 + 3p_0^2 p - p_0^3 = 0,$$

здесь $p_0 < 0$ – желаемый корень.

Приравнивая коэффициенты этих уравнений при одинаковых степенях p , найдём

$$\gamma_1 = -p_0^3 / \beta, \gamma_2 = 3p_0^2 / \beta, \gamma_3 = -3p_0 / \beta. \quad (8)$$

Таким образом, выбор коэффициентов $\lambda_j > 0, j = 1, 2$ и вычисление γ_i согласно (8) обеспечит асимптотическую устойчивость системы (1) с синтезированным законом управления (6).

На рисунках 1, 2 показаны результаты моделирования объекта (1) с синтезированным законом управления (6) при неизмеряемых возмущениях $M_c = M_{c0} = \text{const}$ и

$$J(t) = \begin{cases} J_0 + at + b\sin\sigma_0 t, & t > 4; \\ J_0, & t \leq 4; \end{cases} \quad (9)$$

$$j(t) = \begin{cases} a + b\sigma_0 \cos\sigma_0 t, & t > 4; \\ 0, & t \leq 4. \end{cases} \quad (10)$$

Параметры объекта: $k_m = 1$; $k_e = 1$; $L = 0,1$; $R = 10$; параметры возмущений: $J_0 = 2$; $M_{c0} = 1$; $a = 0,2$; $b = 0,1$; $\sigma_0 = 10$; параметры закона управления: $x_2^0 = 3$; $\beta = 100$; $p_0 = -200$; $\lambda_1 = 100$; $\lambda_2 = 2500$.

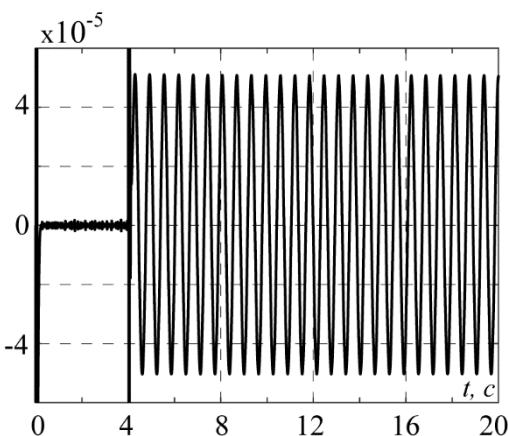


Рисунок 1 – График изменения ошибки

$$\varepsilon(t) = x_2(t) - x_2^0$$

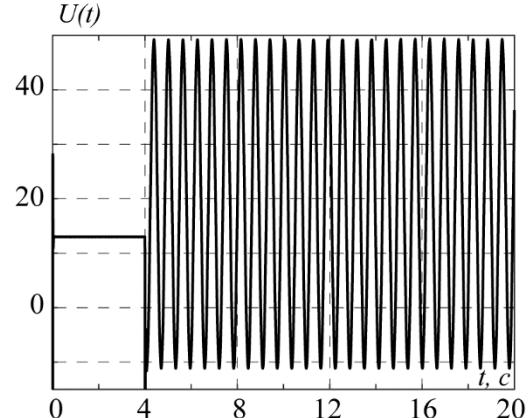


Рисунок 2 – График изменения управления

Как видим из результатов моделирования закон управления (6) обеспечивает выполнение технологического инварианта $x_2 = x_2^0 = \text{const}$ с некоторой ошибкой $|\varepsilon(t)| \leq 10^{-4}$. Её наличие обусловлено сделанными допущениями при формировании модели возмущения (2). Теоретически данную ошибку можно ещё уменьшить за счёт увеличения количества интеграторов, используемых при формировании модели (2). Также можно свести эту ошибку к нулю и за счёт использования наблюдателей возмущений [8–10], но в этом случае структура системы управления существенно усложнится за счёт усложнения структуры подсистемы оценивания, поскольку каждое возмущение

представляется своей отдельной динамической моделью. В практических целях ошибка стабилизации частоты вращения ЭП $|\varepsilon(t)| \leq 10^{-4}$ является приемлемой и, соответственно, полученные результаты говорят об эффективности предложенного подхода.

В [13] отмечается, что если частота гармонического воздействия σ_0 ограничена и выполняется соотношение $2\pi\beta^2 > \sigma_0$, то момент инерции $J(t)$ можно представить его линейным приближением

$$J(t) \approx J_0 + at + b\sigma_0 t, \quad (11)$$

а его производную

$$\dot{J}(t) \approx a + b\sigma_0 = \text{const}. \quad (12)$$

На рисунках 3, 4 показаны результаты моделирования объекта (1) с синтезированным законом управления (6) при неизмеряемых возмущениях $M_c = M_{c0} = \text{const}$, (9) и (10), изменённых согласно (11), (12). Как видим, в этом случае закон управления (6) обеспечивает безошибочное выполнение технологического инварианта $x_2 = x_2^0 = \text{const}$.

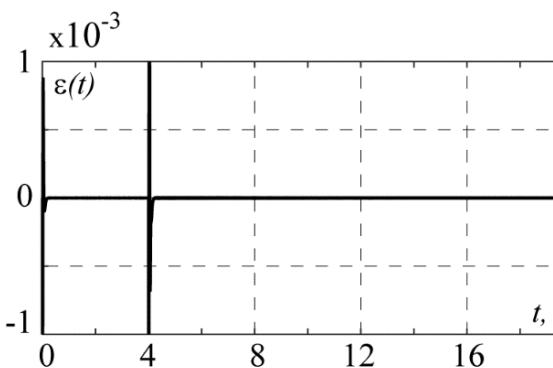


Рисунок 3 – График изменения ошибки

$$\varepsilon(t) = x_2(t) - x_2^0$$

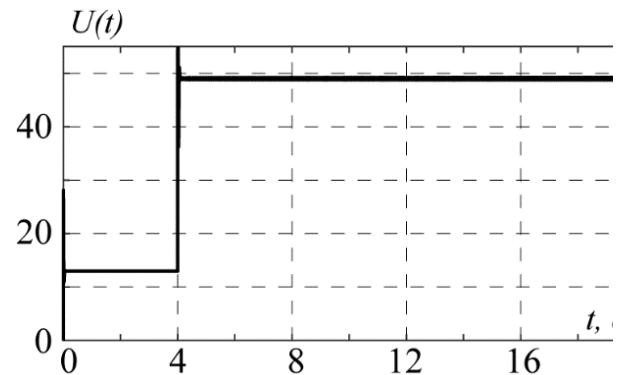


Рисунок 4 – График изменения управления

Пример 2. Интерес к хаотическим системам не утихает в течение последних двух-трёх десятилетий. И если раньше этот интерес сводился преимущественно к выявлению и анализу хаотических систем, то в настоящее время хаотические системы находят широкое инженерное применение, базирующееся на использовании управляемых хаотических систем. Имеется множество публикаций по использованию современных методов теории управления для решения различных задач управления хаотическими системами с разнообразными странными аттракторами [14–17].

В данной работе рассмотрим применение предложенного подхода к решению задачи управления системой с хаотическим аттрактором Генесио-Теси [17]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2; \\ \dot{x}_2(t) &= x_3; \\ \dot{x}_3(t) &= -cx_1 - bx_2 - ax_3 + mx_1^2, \end{aligned} \quad (13)$$

здесь $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)]^T$ – вектор состояния, a, b, c, m – положительные константы, при этом $ab < c$. Система (13) при $a = 1,2$; $b = 2,92$; $c = 6$; $m = 1$ представляет собой неуправляемую хаотическую систему, фазовая траектория которой показана на рисунке 5 [17].

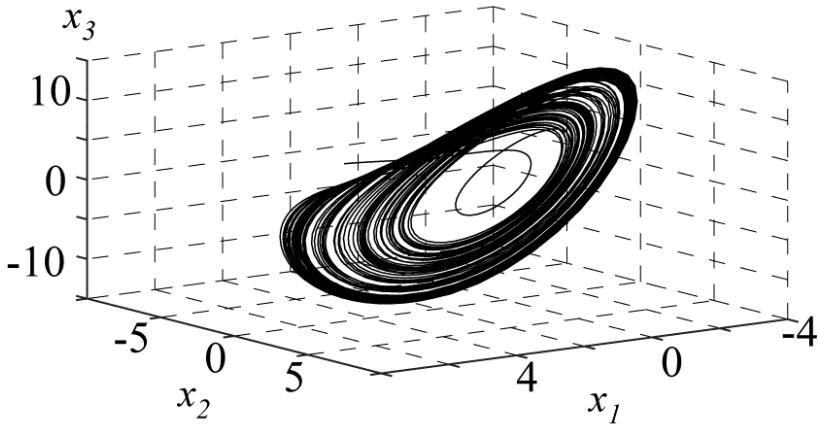


Рисунок 5 – Фазовая траектория системы (13)

Из (13) получим возмущённую систему с управлением:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2; \\ \dot{x}_2(t) &= x_3; \\ \dot{x}_3(t) &= -cx_1 - bx_2 - ax_3 + mx_1^2 + \Delta f + d(t) + U,\end{aligned}\tag{14}$$

здесь Δf – параметрическая неопределённость хаотической системы (13), $d(t)$ – неизмеряемое внешнее возмущение, U – управление.

В общем случае возмущения системы (14) ограничены [17]:

$$|\Delta f| \leq \alpha, \quad |d(t)| \leq \beta,$$

где α, β – положительные константы.

Задача управления системой (14) заключается в обеспечении нулевого значения вектора ошибки:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{E}(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}_d(t)\| = 0,$$

где $\mathbf{X}_d(t) = [x_d(t), \dot{x}_d(t), \ddot{x}_d(t)]^T$ – желаемый вектор состояния.

Рассмотрим построение синергетического закона управления $U = U(\mathbf{X}, \mathbf{z})$ для объекта (14), который обеспечивает компенсацию параметрического и внешнего возмущений при $x_d(t) = 0$.

Согласно методу АКАР сформируем расширенную модель для синтеза закона управления. Введём динамическую модель возмущений

$$\begin{aligned}\dot{z}_1(t) &= z_2; \\ \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ \dot{z}_3(t) &= x_3 + \gamma_1 x_2 + \gamma_2 x_1,\end{aligned}\tag{15}$$

где γ_1, γ_2 – постоянные коэффициенты.

Таким образом, объединяя (14) и (15), получим расширенную систему:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= x_2; \\
\dot{x}_2(t) &= x_3; \\
\dot{x}_3(t) &= -cx_1 - bx_2 - ax_3 + mx_1^2 + z_1 + U; \\
\dot{z}_1(t) &= z_2; \\
\dot{z}_2(t) &= z_3; \\
\dot{z}_3(t) &= x_3 + \gamma_1 x_2 + \gamma_2 x_1.
\end{aligned} \tag{16}$$

В соответствии с методом АКАР введём макропеременную

$$\psi = x_3 + \gamma_1 x_2 + \gamma_2 x_1 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3, \tag{17}$$

здесь β_i – постоянные коэффициенты.

Подставляя ψ (17) в основное функциональное уравнение метода АКАР

$$T\dot{\psi}(t) + \psi = 0 \tag{18}$$

и решая его совместно с (17) и (16), находим закон управления:

$$\begin{aligned}
U(\mathbf{X}, \mathbf{z}) = & -\gamma_2 x_2 - \gamma_1 x_3 + cx_1 + bx_2 + ax_3 - mx_1^2 - z_1 - \beta_1 z_2 - \beta_2 z_3 - \\
& - \beta_3(x_3 + \gamma_1 x_2 + \gamma_2 x_1) + \frac{1}{T}(x_3 + \gamma_1 x_2 + \gamma_2 x_1 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3).
\end{aligned} \tag{19}$$

Решение (18) $\psi = 0$ является асимптотически устойчивым при $T > 0$.

На многообразии $\psi = 0$ динамика системы (16) описывается следующей линейной декомпозированной системой:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= x_2; \\
\dot{x}_2(t) &= -\gamma_1 x_2 - \gamma_2 x_1 - \beta_1 z_1 - \beta_2 z_2 - \beta_3 z_3; \\
\dot{z}_1(t) &= z_2; \\
\dot{z}_2(t) &= z_3; \\
\dot{z}_3(t) &= -\beta_1 z_1 - \beta_2 z_2 - \beta_3 z_3.
\end{aligned} \tag{20}$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов, обеспечивающих устойчивость системы (20), также воспользуемся методом модального управления. Запишем матрицу состояния системы (20) и найдём ее характеристическое уравнение:

$$\begin{aligned}
A(p) = \det(p\mathbf{E} - \mathbf{A}) = & p^5 + (\beta_3 + \gamma_1)p^4 + (\beta_2 + \gamma_1\beta_3 + \gamma_2)p^3 + \\
& + (\beta_1 + \gamma_1\beta_2 + \gamma_2\beta_3)p^2 + (\gamma_1\beta_1 + \gamma_2\beta_2)p + \gamma_2\beta_1 = 0.
\end{aligned}$$

Желаемое характеристическое уравнение с заданным расположением корней представим в виде

$$A_0(p) = (p - p_0)^5 = p^5 + 5p_0p^4 + 10p_0^2p^3 + 10p_0^3p^2 + 5p_0^4p + p_0^5 = 0,$$

здесь $p_0 < 0$ – желаемый корень.

Приравнивая коэффициенты этих уравнений при одинаковых степенях p , найдём

$$\gamma_1 = 2p_0, \gamma_2 = p_0^2, \beta_1 = p_0^3, \beta_2 = 3p_0^2, \beta_3 = 3p_0. \tag{21}$$

Таким образом, выбор $T > 0$ и коэффициентов γ_i, β_j согласно (21) обеспечит асимптотическую устойчивость системы (16) с синтезированным законом управления (19).

На рисунках 6-9 показаны результаты моделирования объекта (14) с синтезированным законом управления (19) при неизмеряемых возмущениях согласно [17]:

$$\Delta f = 0,5 \sin(\pi x_1) \sin(2\pi x_2) \sin(3\pi x_3), d(t) = 0,2 \cos(t). \quad (22)$$

Параметры объекта: $a = 1,2$, $b = 2,92$, $c = 6$, $m = 1$; параметры закона управления: $T = 1$; $p_0 = -4$. При моделировании до момента $t=5$ с объект неуправляем, т.е. $U = 0$.

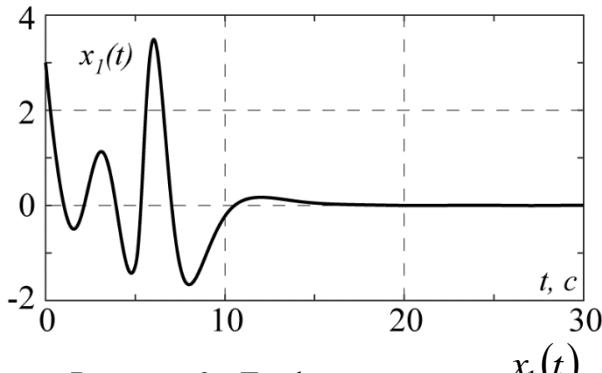


Рисунок 6 – График изменения $x_1(t)$

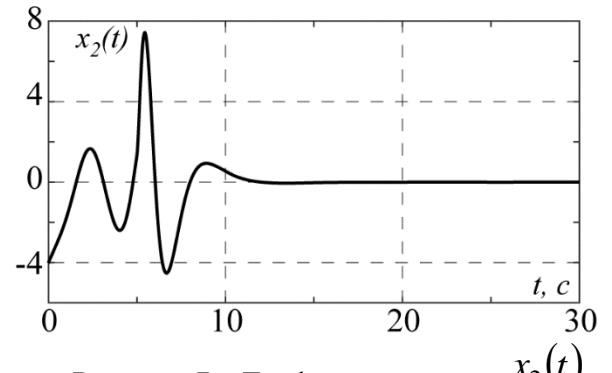


Рисунок 7 – График изменения $x_2(t)$

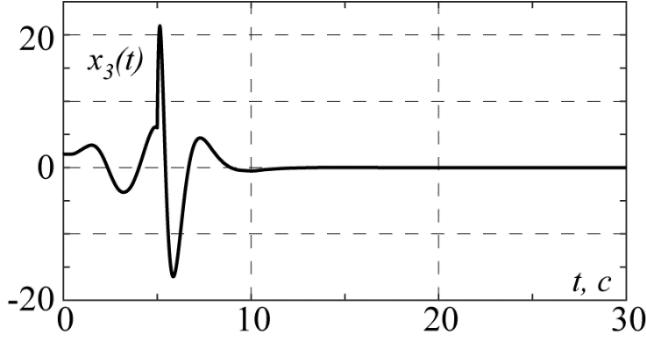


Рисунок 8 – График изменения $x_3(t)$

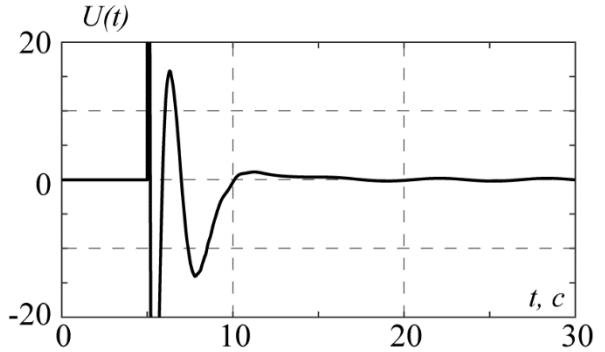


Рисунок 9 – График изменения управления

В [17] для решения аналогичной задачи управления объектом (14) с такими же возмущениями предложено адаптивное управление со скользящим режимом. Опуская процедуру синтеза, приведём конечное выражение для закона управления:

$$U = -c_3 e_3 - c_2 e_2 + \ddot{x}_d(t) - \mu \Phi \Theta, \quad (23)$$

здесь $e_1 = x_1(t) - x_d(t)$, $e_2 = x_2(t) - \dot{x}_d(t)$, $e_3 = x_3(t) - \ddot{x}_d(t)$ – компоненты вектора ошибки;

$\Theta = \hat{c}|x_1| + \hat{b}|x_2| + \hat{a}|x_3| + \hat{m}|x_1^2| + \hat{\alpha} + \hat{\beta}$, $s = e_3 + c_2 e_2 + c_1 e_1$ – поверхность скольжения;

$\Phi = (1 - \exp(-\hat{\lambda}s))(1 + \exp(-\hat{\lambda}s))^{-1}$, c_1, c_2, μ – положительные константы.

Закон управления (23) дополняется подсистемой динамического оценивания параметров:

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{\lambda}}(t) &= -\gamma \Phi \exp(\hat{\lambda}s), \quad \hat{\lambda}(0) = \hat{\lambda}_0; \\
\dot{\hat{c}}(t) &= |s| |x_1|, \quad \hat{c}(0) = \hat{c}_0; \\
\dot{\hat{b}}(t) &= |s| |x_2|, \quad \hat{b}(0) = \hat{b}_0; \\
\dot{\hat{a}}(t) &= |s| |x_3|, \quad \hat{a}(0) = \hat{a}_0; \\
\dot{\hat{m}}(t) &= |s| |x_1^2|, \quad \hat{m}(0) = \hat{m}_0; \\
\dot{\hat{\alpha}}(t) &= \dot{\hat{\beta}}(t) = |s|, \quad \hat{\alpha}(0) = \hat{\alpha}_0, \hat{\beta}(0) = \hat{\beta}_0,
\end{aligned} \tag{24}$$

где $\hat{\lambda}_0, \hat{c}_0, \hat{b}_0, \hat{a}_0, \hat{m}_0, \hat{\alpha}_0, \hat{\beta}_0$ – положительные и ограниченные начальные значения параметров, γ – положительная константа. Параметры закона управления (23), (24) согласно [17]: $c_1 = 10; c_2 = 6; \mu = 1.1; \gamma = 1; \hat{\lambda}_0 = 0.5; \hat{c}_0 = 9; \hat{b}_0 = 7; \hat{a}_0 = 5; \hat{m}_0 = 3; \hat{\alpha}_0 = 1; \hat{\beta}_0 = 11$.

Результаты моделирования объекта (14) с адаптивным законом управления (23), (24) при тех же неизмеряемых возмущениях (22) и тех же начальных условиях по переменным состояния системы (14) имеют схожий качественный характер и динамические характеристики. Однако следует отметить следующие преимущества синергетического закона управления (19):

- закон управления (19) структурно проще, т.к. содержит только одну нелинейную составляющую;
- закон управления (19) содержит три динамические компоненты – систему (15), а закон управления (23) содержит семь динамических компонент – систему (24);
- закон управления (23) при больших отклонениях от состояния равновесия приводит к возникновению высокочастотного изменения амплитуды управления с переключением полярности, а закон управления (19) не приводит к такому негативному эффекту.

Заключение

В работе представлено развитие принципа интегральной адаптации СТУ для синтеза синергетических законов робастного управления нелинейными техническими системами. Основная идея нового подхода заключается в использовании одной модели возмущения высокого порядка, состоящей из последовательно включённых интеграторов (не менее трёх), вместо отдельных моделей для каждого возмущения в отдельности. Представлены примеры синтеза, которые продемонстрировали эффективность предложенного подхода – обеспечивается выполнение технологических задач и асимптотическая устойчивость замкнутой системы, а с приемлемой ошибкой компенсируются неизмеряемые параметрические и внешние возмущения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design. – New York: Wiley, 1995. – 563 p.
2. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 550 с.
3. Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. – New York: Dover, 2012. – 848 p.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
5. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – 2-е изд. – М.: Либроком, 2012. – 240 с.
6. Кузьменко А.А. Нелинейный синтез закона адаптивного управления частотой вращения гидротурбины: интегральная адаптация // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2015. – № 1-2. – С. 85-94.

7. 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. – Т. 56. – № 2.1. – С. 146-150.
8. Кузьменко А.А. Нелинейное адаптивное управление турбогенератором // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – №1. – С. 112-119.
9. Кузьменко А.А. Нелинейные адаптивные законы управления турбиной судовой энергоустановки // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – №4. – С. 38-51.
10. 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. (в печати).
11. Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А. Методы АКАР и бэкстеппинг в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – №7. – С. 435-445.
12. 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.
13. Колесников А.А., Топчиев Б.В. Синергетический подход к проблеме формирования искусственной самоорганизации управляемых систем. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – №2. – С. 2-11.
14. Ott E., Grebogi C., Yorke J.A. Controlling chaos // Phys. Lett. A. – 1990. – Vol. 64. – Pp. 1196–1199.
15. Fradkov A.L., Evans R.J. Control of chaos: methods and applications in engineering // Ann. Rev. Control. – 2005. – Vol. 29. – Pp. 33–56.
16. Fradkov A.L., Pogromsky A.Yu. Introduction to control of oscillations and chaos. – Singapore: World Scientific, 1998. – 391 p.
17. Dadras S., Momeni H.R. Control uncertain Genesio-Tesi chaotic system: Adaptive sliding mode approach // Chaos, Solitons and Fractals. – 2009. – Vol. 42. – Pp. 3140–3146.

ПОНИЖАЮЩИЙ НЕИЗОЛИРОВАННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

Аннотация. Работа посвящена исследованию процессов управления для широтно-импульсных преобразователей постоянного тока. Рассматривается широтно-импульсный неизолированный понижающий преобразователь постоянного тока. Цель данной работы – провести синтез синергетического регулятора широтно-импульсного неизолированного преобразователя напряжения и провести оценку качества переходной характеристики выходного напряжения при различных нагрузках. Реализация алгоритмов управления на цифровых вычислителях.

Ключевые слова: Широтно-импульсный преобразователь; понижающий неизолированный преобразователь напряжения; метод АКАР; синтез; управление; интегральная адаптация; ПИД-регулятор; переменная структура; микроконтроллер.

Annotation. The work is devoted to the study of control processes in pulse-width DC converters. The pulse-width non-insulated step-down DC converter is considered. The purpose of this work is to carry out the synthesis of synergistic controller for pulse-width non-insulated voltage converter and assess the quality of the output voltage transfer characteristic at different loads. Implementation of control algorithms on digital calculators is also the aim.

Keywords: Pulse width converter; step-down non-insulated voltage converter; method of AKAR; synthesis; control; integral adaptation; PID controller; variable structure; microcontroller.

Введение. Работа любой электронной схемы требует наличия одного или нескольких источников постоянного напряжения. Подавляющее большинство современных преобразователей напряжения представляют собой импульсные источники питания (ИИП). Достоинство ИИП в сравнении с линейными преобразователями заключается, в первую очередь, в большем коэффициенте полезного действия и меньших массогабаритных размерах.

Поведение ИИП описывается нелинейными математическими моделями, которые характеризуются неустойчивость, бифуркациями, хаосом и т.д. [1]. Возникновение этих явления в ИИП обусловлено топологией печатной платы, режимами работы преобразователя, паразитными явлениями, которыми обладают радиоэлементы электрической схемы. Первые ИИП не подвергались математическому анализу, а тем более прогнозированию поведения системы, по причине отсутствия хорошей аналитической модели, которая была представлена в 1970 годах [2]. В настоящее время хаос и бифуркации в ИИП вызывают исследовательский интерес. Данным проблемам посвящено не мало работ, в которых рассматриваются способы прогнозирования возникновения хаоса ИИП при помощи компьютерного моделирования и систем дифференциальных уравнений объекта или идеализированной электрической схемы ИИП [3–6]. Как показывают результаты исследований, основными причинами возникновения хаоса является снижение нагрузки и/или изменение входного напряжения в широком диапазоне. Данные явления ухудшают технические характеристики ИИП и могут приводить к выходу из строя преобразователей. Каждый инженер, проектировавший ИИП сталкивался с бифуркационными явлениями и хаосом. Традиционно эта проблема решается инженерным подходом, заключающимся в корректировке номиналов радиоэлементов и ограничении технических параметров системы.

На практике в контролерах широтно-импульсной модуляции широкое применение нашел гистерезисный регулятор, например микросхемы TL494, MC34063 и др., принцип работы которого основан на формировании «разрешающего» сигнала компаратором при нахождении значения выходного напряжения в заданных границах. В таких системах качество стабилизации выходного напряжения зависит от точности обратной связи, опорного напряжения, скорости реакции

радиоэлементов на изменение состояния их входов и устойчивости к внешним возмущениям. В целях расширения области устойчивости данный регулятор дополняют гистерезисным регулятором тока и контролем входного напряжения и т.д., например микросхема LTC1871.

В цифровых ИИП наибольшее распространение получили ПИД-регуляторы предъявляющие минимальные требования к мощностным характеристикам цифрового вычислителя, что позволило реализовывать многоканальные ИИП на ПЛИС [7, 8], микроконтроллерах и т.д. В практике параметры ПИД-регулятора часто настраиваются путем подбора с использованием опыта управления объектом, такой инженерный подход к настройке регулятора вносит существенное влияние человеческого фактора на качество работы системы и исключает возможность прогнозирования возникновения хаоса или неустойчивого поведения замкнутой системы. В ряде работ [9–11] рассматривается вопрос расширения области устойчивости ПИД-регулятора с помощью применения нечеткой логики, адаптивного управления. Однако, в таких системах при больших возмущающих воздействиях параметры настройки адаптивного управления могут сбиться, и система на некоторое время может перейти в колебательный режим со значениями, превышающими пределы регулируемой величины. Для эффективной работы традиционных алгоритмов адаптации необходимо осуществлять предварительную идентификацию объекта, однако существующие алгоритмы не для всех типов ИИП осуществляют корректно эту процедуру и не учитывают ограничения, связанные с особенностями нагрузки ИИП. При проектировании ПИД-регуляторов с нечеткой логикой правила нечеткой логики составляются на основе высказываний эксперта и не всегда исключают формирования регулятором неадекватного управляющего воздействия в нештатных режимах работы ИИП. Поэтому в работах [9–11] рассматривают преобразователи под конкретные задачи и область работы. Не смотря на присущие недостатки ПИД-регулирования с нечеткой логикой или адаптивным управлением, такие регуляторы нашли широкое применение в современных цифровых ШИМ-контроллерах, таких как UCD9224, UCD3138 и других.

При проектировании регуляторов с использованием теории скользящего управления в отличии от выше перечисленных учитывает динамическую модель объекта, но при этом основной задачей разработчика регулятора является построение линии переключения в фазовом пространстве объекта. При этом наклон линии должен быть выбран таким, чтобы в системе не возникали колебания. Существует несколько условий возникновения скользящего режима. Одним из них является симметричность траекторий разгона и торможения. В работе [12], как и в других рассматривается синтез скользящего регулятора при идеализированных условиях, где наблюдается только симметричность фазовых траекторий объекта. Вопрос учета изменения параметров радиоэлементов под воздействием внешних возмущений влияющие на динамику и поведение объекта не освещается.

Синергетика, как науку о самоорганизации относиться к «новой» динамике. Синергетические системы обладают двумя фундаментальными свойствами. Первое обмен энергией с внешней средой. Второе, когерентность поведения между составными частями системы, то есть взаимодействие. Синергетическая теория управления базирующееся на принципах направленной самоорганизации и динамической декомпозиции синтезируемых нелинейных систем на притягивающих инвариантных многообразиях. Она отражает идеологию единства процессов самоорганизации и управления, т.е. представляет собой своего рода симбиоз кибернетики и синергетики [13].

Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) базируется на принципе «расширения – сжатия» фазового пространства. Целью данного регулятора заключается в переходе от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению вдоль желаемых инвариантных многообразий – аттракторов, к которым подстраиваются все другие переменные динамической системы [13]. В работах [14–20] рассматривается синтез управляющего воздействия для различных нелинейных систем в том числе и применение в ИИП различной топологии на основе динамической системы уравнений объекта.

Таким образом синтез регулятора, формирующего управляющее воздействие в соответствие с динамикой объекта, его физических особенностей и учета внешних неопределенных возмущений, является актуальным.

Синергетический регулятор. Рассмотрим синтез управляющего воздействия методом АКАР для неизолированного понижающего ИИП в режиме непрерывных токов и постоянной частоты коммутации силового ключа.

Синтез регулятора методом АКАР проводится на основе динамической системы уравнений управляемого объекта. Математическая модель понижающего ИИП составляется по законам Кирхгофа в соответствии с законами коммутации силового ключа [21]. Воспользуемся усредненной математической моделью в форме Коши, полученную в работе [22] и электрической схемой, показанной на рис. 1

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(E_{in} * u - i_L * r - U_{out}); \\ \frac{dU_{out}}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_{out}). \end{cases} \quad (1)$$

Где: E_{in} – входное напряжение; u – рабочий цикл (управляющее воздействие); i_L – ток индуктивности; r – сопротивление обмотки индуктивности; U_{out} – выходное напряжение; C – выходной конденсатор; i_{out} – ток нагрузки

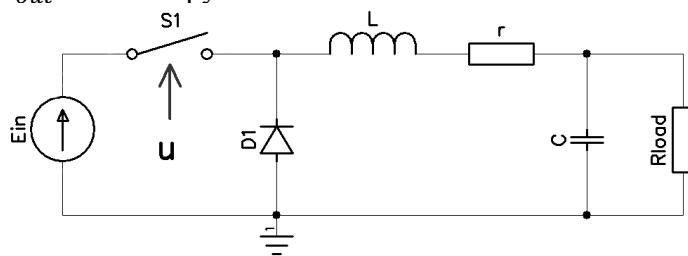


Рисунок 1 – Электрическая схема понижающего ИИП

Синтезированный с использованием метода АКАР регулятор должен обеспечить перевод замкнутой системы из любого состояния к аттрактору. С целью проектирования замкнутой системы управления ИИП, обладающей свойствами инвариантности к внешним возмущающим воздействиям и робастности к изменению параметров, при синтезе регулятора будем использовать метод интегральной адаптации на инвариантных многообразиях, являющийся модификацией метода АКАР [23]. Для этого расширим исходную динамическую систему (1) дополнительным дифференциальным уравнением:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(E_{in} * u - i_L * r - U_{out}); \\ \frac{dU_{out}}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_{out}) - z; \\ \frac{dz}{dt} = \eta(U_c - U_{out}). \end{cases} \quad (2)$$

Вводим первую макропеременную:

$$\Psi_1 = i_L - \varphi_{(U_{out}, z)}. \quad (3)$$

где – так называемое «внутреннее» управление системы. Подставляя (3) в основное функциональное уравнение (ОФУ):

$$\dot{\Psi}_1 + \alpha_1 \Psi_1 = 0. \quad (4)$$

находим внутреннее управление:

$$u = - \left(-CR_{load}U_{out} + CR_{load}ri_L - \left(\frac{d\varphi_{(U_{out}, z)}}{dU_{out}} \right) Li_L R + \left(\frac{d\varphi_{(U_{out}, z)}}{dU_{out}} \right) LU_{out} + \left(\frac{d\varphi_{(U_{out}, z)}}{dU_{out}} \right) LZCR_{load} - \left(\frac{d\varphi_{(U_{out}, z)}}{dU_{out}} \right) \eta LCR_{load}U_C + \left(\frac{d\varphi_{(U_{out}, z)}}{dU_{out}} \right) \eta LCR_{load}U_{out} + \alpha_1 LCR_{load} - LCR_{load}\varphi_{(U_{out}, z)} \right) / (E_{in}CR_{load}). \quad (5)$$

В результате попадания системы в окрестность многообразия (3) в системе происходит динамическая декомпозиция и поведение системы будет описываться системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{dU_{out}}{dt} = \frac{\varphi(U_{out}, z) - \frac{U_{out}}{R}}{C} - z; \\ \frac{dz}{dt} = \eta(U_c - U_{out}). \end{cases} \quad (6)$$

Вводим вторую макропеременную для системы (6):

$$\Psi_2 = U_{out} + \gamma z. \quad (7)$$

Применяем ОФУ для нахождения $\varphi(U_{out}, z)$:

$$T\dot{\Psi}_2 + \alpha_2\Psi_2 = 0. \quad (8)$$

Из совместного решения (8) и (7) с учетом модели (6) получим выражение для внутреннего управления, подставив которое в (5) получим

$$u = -\frac{CL\eta}{E_{in}}(\gamma(\alpha_1 + \alpha_2) - 1)(U_c - U_{out}) - \frac{L - R_{load}C(L(\alpha_1 + \gamma\eta + \alpha_2 - \alpha_1\alpha_2R_{load}C) + R_{load})}{R_{load}^2CE_{in}} * \\ * U_{out} - \frac{R_{load}C(r+L(\alpha_1+\alpha_2-\gamma\eta))}{R_{load}CE_{in}} i_L - \eta L \frac{1+R_{load}C(y\eta+\alpha_1\alpha_2\gamma-\alpha_1-\alpha_2)}{R_{load}E_{in}} z \quad (9)$$

Синтезированное управляющее воздействие обеспечить перевод динамической системы (1) из произвольного состояния вначале в окрестность многообразия, а затем в состояние, определяемое требуемым значением выходного напряжения. Коэффициенты настраиваются таким образом, чтобы получить желаемый переходной процесс. Изменяя значение коэффициентов корректируется время выхода на заданное напряжение, выброс напряжения при изменении нагрузки, величина перерегулирования.

Сравним управляющее воздействия (9) и ПИД-регулятор. Представим ИПП под управлением традиционного регулятора [24] в виде схемы показанной на рис. 2:

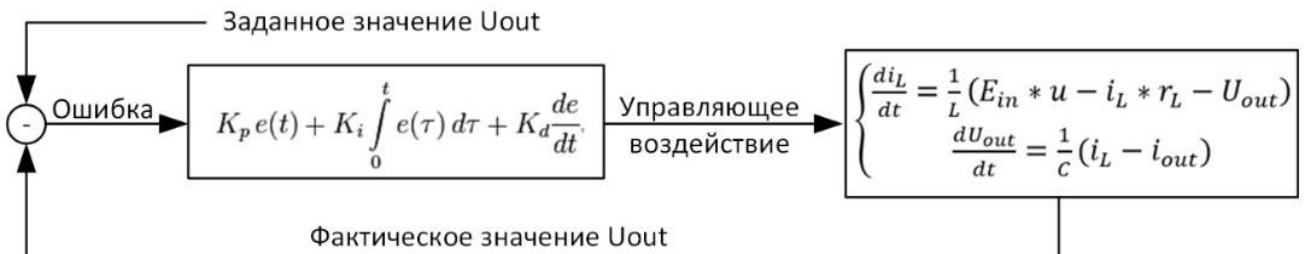


Рисунок 2 – Схема ИПП под управлением ПИД-регулятора

Блок ПИД-регулятора на рис. 2 во время работы оперирует только относительно величины рассогласования выходного напряжения и заданного. Управляющее воздействие формируется на основе статических П, И, Д коэффициентов и динамической ошибки. Никакой другой информации в процессе работы о состоянии системы ПИД-регулятор не получает. Управляющее воздействие (9) включает все элементы динамической системы, которые могут быть представлены в виде функций зависимости от внешних возмущений. Проведем моделирование синтезированного управляющего воздействия (9) в среде «Matlab Simulink». Составим электрическую схему, показанную на рисунке 3. Зададим исходные данные:

$$E_{in_max} = +36V; U_{out} = +5V; f_{sw} = 100\text{кГц}; \Delta U = +0.1V; U_{ripple} = +0.04V; \\ I_{out} = 10A; L = 7.176 * 10^{-5}\text{Гн}; C = 1.884 * 10^{-3}\text{Ф.}$$

Где: ΔU -максимальный выброс напряжения на выходе при снятии нагрузки; U_{ripple} -пульсации напряжения на выходе.

Сравнение переходных процессов выходного напряжения и тока, показанные на рис. 3 и 4, позволяет утверждать, что при изменении рабочей нагрузки до 5А наблюдается ухудшение качества переходного процесса – появляются перерегулирование и затухающие колебания. Зададим в управляющем воздействии (9) сопротивление нагрузки согласно закону Ома $R_{load} = U_{out}/i_{out}$. В

результате синтезированный с помощью метода АКАР закон управления начинает формировать управляющий сигнал оперируя действующим током, а не заданным. Результаты моделирования, представленные на рис. 5, демонстрируют, что система управления с синергетическим регулятором с подстраиваемым значением сопротивления нагрузки отрабатывает заданное значение выходного напряжения, но при этом имеется незначительное перерегулирование переходного процесса.

Внешняя среда оказывает влияние на параметры радиоэлементов ИИП. В следствии чего качество стабилизации выходного напряжения снижается и может привести к потере устойчивости ИИП [1–6]. Например, емкость выходного электролитического конденсатора C имеет нелинейную функцию зависимости от температуры окружающей среды, такие данные доступны в технической документации. На рисунке 6 представлены графики зависимости емкости электролитических конденсаторов фирмы «Epcos» от окружающей температуры. На примере изменения сопротивления нагрузки в уравнении (9) на номинальное значение, рассчитанное по закону Ома, могут быть введены различные функции зависимости остальных параметров преобразователя.

Не смотря на повышения качества переходного процесса в синтезированном управляющем воздействии методом АКАР, имеется перерегулирование при понижении тока нагрузки, так как регулятор настроен на ток нагрузки равный 10А. Для устранения перерегулирования модернизируем синтезированный синергетический регулятор сделав коэффициент α_2 переменным.

Проведя анализ графики переходного процесса относительно выходного напряжения и производной от выходного напряжения можно разбить график на три участка: разгон, выход на режим, торможение. Сформулирует правила изменения коэффициента на этих участках. Первоначальное значение инициализируется равное нулю. На участке разгона введем линейное увеличение значения с целью сокращения времени выхода на режим. При попадании область выхода на режим коэффициент фиксируем. Необходимо определить границы области выхода на режим. Из анализа рис. 7 и 8 можно сделать заключение, что участок выхода на режим можно определить в пределах от -10 до значения производной, соответствующей 80 % заданного значения U_{out} , то есть +4В. Из графика верхнюю границу определим равной 10. В области торможения коэффициент должен линейно уменьшаться.

Запишем полученные правила:

```
if speed<(-1)
if alpha2<=1000
alpha2_out=alpha2+0.005;
end
elseif speed>10
alpha2_out=alpha2-0.0025;
else
alpha2_out=alpha2;
end
```

На рис. 9 представлены результаты моделирования замкнутой системы с синергетическим регулятором с изменяющимся коэффициентом α_2 при токе нагрузки равном 1А. Сравнительный анализ результатов моделирования, представленных на рис. 5 и 9, демонстрирует, что при введении правил изменения коэффициента α_2 время выхода на режим не изменилось, но в переходном процессе относительно выходного напряжения отсутствует перерегулирование. На основе разработанного алгоритма регулятора с переменным коэффициентом функционального уравнения можно реализовать сервисную функцию «Soft-Start». Плавный пуск обеспечивает не только контроль за скоростью выхода на заданное напряжение, но также повышает рабочий ресурс выходных электролитических конденсаторов, ограничивая ток заряда.

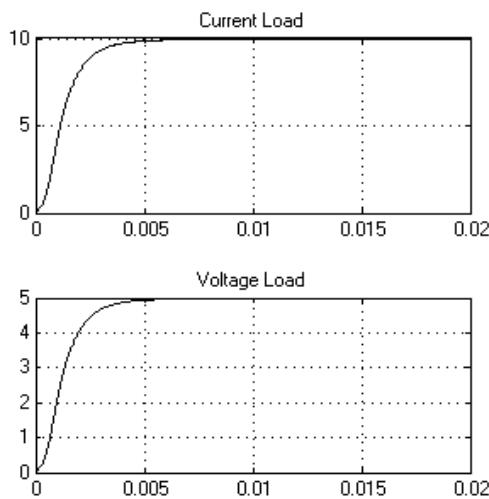


Рисунок 3 – Моделирование понижающего ИИП при нагрузки равной 10 А

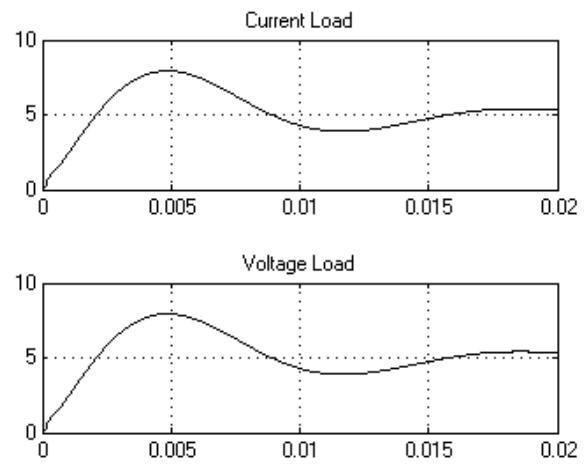


Рисунок 4 – Моделирование понижающего ИИП при нагрузки равной 5 А

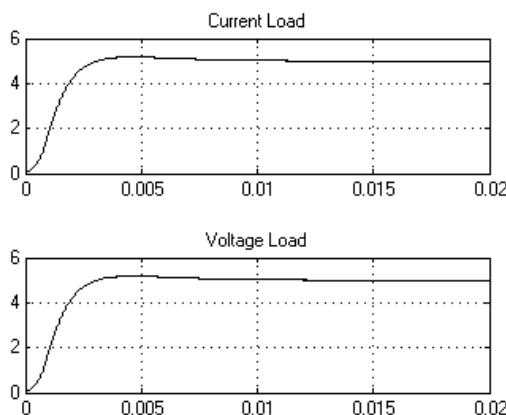


Рисунок 5 – Динамический коэффициент сопротивление нагрузки

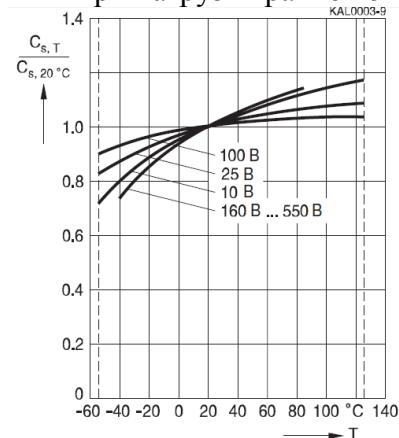


Рисунок 6 – Нормирование емкости C_S от температуры окружающей среды

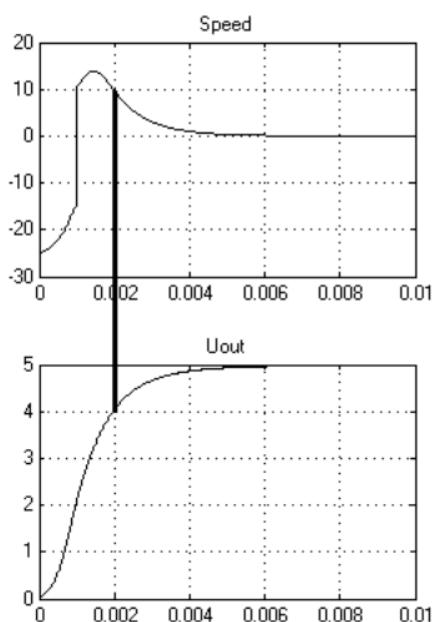


Рисунок 7 - Осциллографма определения «Х»

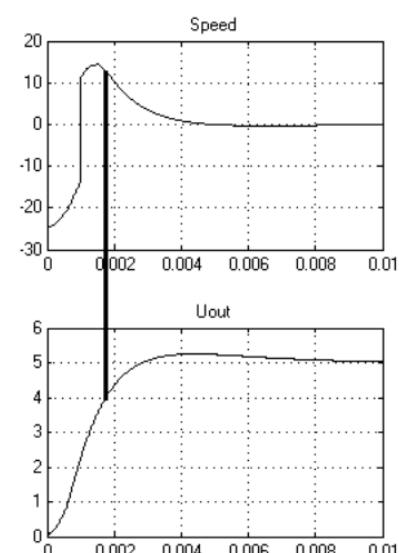


Рисунок 8 - Осциллографма с перерегулированием

Практическая реализация синергетического регулятора. При практической реализации нелинейных регуляторов ИИП у разработчиков возникает ряд затруднений, такими как наличия четких методик настройки параметров регулятора, определение необходимой мощности цифрового вычислителя и др. Конечно можно в качестве исполнительного цифрового вычислителя выбрать мини-компьютер, например «*Raspberry Pi x, Cubieboard*» и др. Мощность процессоров данных миникомпьютеров высока, но вот по массогабаритным размерам и ценовому диапазону они уступают аналоговым ШИМ-контроллерам. При реализации традиционных регуляторов разработчик располагает рядом сервисов связанных с расчетом параметров настройки регуляторов, например с использованием пакетов *Matlab* и *Simulink* можно выполнить расчет параметров ПИД-регулятора и генерацию программного кода на языках *C#* и *C++* для программирования ПЛИС фирмы «*Altera*».

Рассмотрим особенности синтезированного управляющего воздействия (9), которые придётся учитывать при практической реализации: наличие переменных с плавающей точкой; наличие в законе управления различных математических операций; необходимость наличия датчиков тока нагрузки и выходного напряжения. Данные обстоятельства накладывают ограничения на выбор вычислителя, на котором возможна реализация данного регулятора. Стоит отметить, что преобразование переменных типа «*float*» в тип «*int*» не всегда возможно, кроме того необходимость измерения тока нагрузки требует наличие дополнительного высокопроизводительного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), также необходимо учесть необходимость реализации цифрового фильтра для второго канала измерения. Необходимым функционалом и мощностями обладают 32-bit микроконтроллеры со встроенными параллельно работающими АЦП. При наличии переменных с плавающей точкой дополнительно потребуется математический сопроцессор.

В качестве управляющей микросхемы для построения цифрового синергетического регулятора понижающего ИИП была выбрана плата *Stm32f4Discovery* на базе микроконтроллера *STM32F407VG*. Таймер работает на частоте 42МГц и настроен на генерацию ШИМ-сигнала с частотой 100кГц. Расчет управляющего воздействия происходит с частотой 100 кГц. В целях оптимизации быстродействия микроконтроллера передача данных от АЦП происходит по DMA.

Фотографии осциллографм синергетической системы управления понижающим ИИП выполненной на макетной плате представлены на рис. 10 и 11. Результаты натурного эксперимента подтверждают эффективность синтезированной системы управления ИИП.

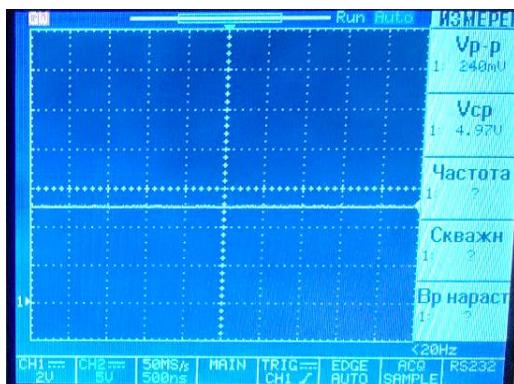


Рисунок 10 – Осциллографма и выходного напряжения

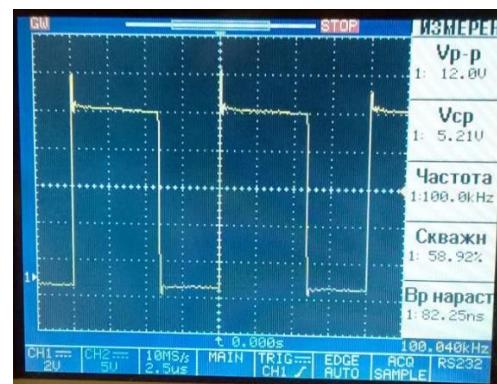


Рисунок 11 – Осциллографма сигнала стока Р – канального полевого транзистора

Заключение. В работе рассматривается задача синтеза и реализации синергетического регулятора понижающим ИИП с учетом его нелинейных свойств. Помимо традиционной схемы синергетического регулятора рассматривается модифицированная схема с изменяющимся коэффициентом основного функционального уравнения, что позволило повысить не только качество переходной характеристики системы, но и учесть изменения под воздействием внешних неопределенных возмущений параметров радиоэлементов ИИП. В работе рассмотрены вопросы реализации синтезированного синергетического регулятора и проведения натурных экспериментов.

Проведенные исследования показывают преимущества применения синергетических регулятор при проектировании цифровых систем управления, работающих в переменных условиях окружающей среды, в сравнении с традиционными регуляторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chi, Kong Tse. Complex behavior of switching power converters, CRC PRESS, 2004.
2. Middlebrook R.D. and C'uk S. A general unified approach to modeling switching-converter power stages, in Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf., 1976, pp. 18-34.
3. Pelin D., Flegar I., Fischer D. Prediction and observation of chaos in the buck converter, Faculty of Electrical Engineering & Technical College Zagreb, University of Osijek, 2007.
4. Somnath Maity, Tapas K. Bhattacharya and Soumitro Banerjee. Experimental Study of Chaos and Bifurcation in the Buck Converter, National conference on nonlinear systems & dynamics, 2006.
5. Kocewiak L., Leth Bak C., Munk-Nielsen Stig. Bifurcations and Chaos in a Pulse Width Modulation Controlled Buck Converter, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Pontoppidanstræde 101, 9220 Aalborg, Denmark 2008.
6. Feigin M.I. Doubling of the oscillation period with C-bifurcations I piecewise continuous systems, PMM, 1970, Vol. 34.
7. Zurita-Bustamante E.W., Linares-Flores J., Guzmán-Ramírez E., S.-Ramírez H. FPGA Implementation of PID Controller for the Stabilization of a DC-DC “Buck” Converter. Universidad del Istmo, Mexico.
8. Shubhangi V. Pati, Tejasree R. Shukla, Paresh J. Shah. Modeling of PID controller based smps using FPGA, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2012.
9. Bayati Poodeh M., s. Eshtehardiha, m.R. Zare. Application of Fuzzy Logic to Control the DC-DC Converter, 7th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Venice, Italy, November 21-23, 2007.
10. Priyanka Srivastava, Sh. S.K. Singh, Sh. Nishant Tripathi. Study of fuzzy logic and PID controller in buck-boost converter, International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), 2014, Vol. 3, Issue 6.
11. Reza Ilka, S. Asghar Gholamian, Behrouz Rezaie and Alireza Rezaie. Fuzzy Control Design for a DC-DC Buck Converter based on Recursive Least Square Algorithm, International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA), 2012, Vol. 2, No. 6.
12. Guldemir Hanifi. Study of Sliding Mode Control of Dc-Dc Buck Converter, Energy and Power Engineering, 2011, pp. 401-406.
13. Kolesnikov A.A. Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya [Modern applied control theory]. Part 2. Sinergeticheskiy podkhod v teorii upravleniya [Synergetic approach in control theory]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 558 p.
14. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kuz'menko A.A., Pogorelov M.E., Kondrat'ev I.V. Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: energeticheskie sistemy [Synergetic control methods of complex systems: the energy system]. Moscow: Editorial URSS, 2005.
15. Veselov G.E., Kondrat'ev I.V., Medvedev M.Yu. Sinergeticheskoe upravlenie shirotno-impul'snymi preobrazovatelyami [Synergetic control for pulse width modulated converters], Nelineynyy mir [Nonlinear world], 2004, Vol. 2, No. 4, pp. 266-277.
16. Kondratiev I., Santi B., Dougal R., Veselov G. Synergetic control for dc-dc buck converters with constant power load, 35th Annual IEEE Power Electronics Conference. 20-25 June. Aachen. Germany. 2001, pp. 3758-3764.
17. Kondratiev I., Santi B., Dougal R., Veselov G. Synergetic control for m-parallel connected dc-dc buck converters, 35th Annual IEEE Power Electronics Conference. 20-25 June. Aachen. Germany. 2004, pp. 182-188.
18. Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Kravtchenko P., Pogorelov M., Dougal R., Kondratiev I. Synergetic Synthesis of Adaptive Regulators for DC/DC Boost Converters, Power System 2002 Conference «Impact of Distributed Generation». March 13-15. Clemson. SC. USA. 2002.

19. Kolesnikov A. Veselov G.. Popov A. Kolesnikov Al., Medvedev M., Dougal R. Kondratiev I. Synergetic Control for Group of DC/DC Buck Converters, Power System 2002 Conference «Impact of Distributed Generation». March 13-15, Clemson, SC, USA, 2002.
10. Kolesnikov A., Veselov G., Kolesnikov Al., Monti A., Ponci F., Santi E., Dougal R. Synergetic synthesis of DC-DC converter controller: Theory and Experimental Analysis, IEEE APEC. March 10 14. Dallas. Texas. USA.2002, pp. 401-415.
21. Kazimierczuk M.K. Pulse-width modulated dc–dc power converters, 2008.
22. Mezhakov O.G. Matematicheskaya model' ponizhayushchego preobrazovatelya napryazheniya [Mathematical model of voltage step-down converter], Molodoy uchenyy [Young scientist]. Mart 2015, pp. 171-176.

Мельников Владимир Павлович

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

ИНФОРМАЦИОЛОГИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И СИНЕРГЕТИКА ОРУЖЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В статье представлена методология применения технологий информационных войн при геополитическом взаимодействии стран, а также рассмотрены самые современные оружейные технологии, обладающие высокой степенью поражающего эффекта, которые находятся в различного уровня технологических реализаций США и странах Запада. Приведены возможности и поражающие эффекты технических средств и таких технологий. Приводится классификационная схема технологий оружейных воздействий в Земном сообществе.

Ключевые слова: информационная война, безопасность, информациологическое оружие, оружейные технологии, информационные технологии.

Annotation. the article presents the methodology of application of technologies of information warfare in geopolitical cooperation between the countries, and considered the most modern weapons technology having a high degree of damaging effect in various technological implementations of the US and Western countries. Given the possibility and effects of technical measures and such technologies. Provides a classification scheme technology weapons effects in the Earth community.

Keywords: information warfare, security, informationalism weapons, weapons technology, information technology.

Ряд государств, владеющих высоким научным потенциалом, современными информациологическими ресурсами и технологиями, становятся лидерами на планете с помощью СМИ, локальных информационных войн (ЛИВ) и других информационных методов и средств. Такие государства могут держать весь мир в напряжении и страхе, воздействуя информациологическим оружием на сознание каждого жителя Земли. Общепланетарное информационное пространство в настоящее время для многих государств стало яблоком раздора, объектом борьбы за информационные привилегии, политические, экономические и сырьевые преимущества [1]. Во многих научных публикациях обосновывается, что развал СССР – это результат информациологической войны, доказавшей, что информация, информациологические ресурсы и технологии являются постыдерным оружием, более сильным и более разрушительным о котором не знала история.

Применение вышеуказанных атрибутов войн осуществляется рядом стран в купе с видами обычного традиционного оружия, которое за многовековую историю человечества было создано и применяется до сих пор.

Специалисты считают, что человечество за всю свою историю пережило войны шести поколений и громадное количество видов военных взаимодействий как глобальных, так и региональных [2,3]. Здесь надо отметить, что войны предыдущих цивилизаций Земных сообществ мало изучены и их оружейные технологии, методы и средства применения недостаточно известны [4].

Прототип войны шестого поколения начал применяться в конце прошлого века. Он характеризуется применением высокоточного современного на период XX века оружия, позволяющего точечными ударами вывести из строя военную оборонительную, экономическую и энергетическую инфраструктуры противника. Такое оружие было использовано для войны в Ираке (1991, 1996 и 1998гг), Югославии (1999г), Ливии (2011г), Сирии (2014-2015гг).

Но уже сейчас наряду с приведенными оружейными технологиями начинает основываться методология информационной войны, в основе которой лежит информациологическое воздействие, обеспечивающее изменение сознания людских масс противника и уничтожения инфраструктуры страны, на которую направлено информациологическое оружие [5].

Сейчас уже можно считать, что в практическую fazу военных действий вступают оружейные технологии седьмого поколения, представляющее собой симбиоз информационных технологий изменения сознания человеческого сообщества и оружейных технологических средств летального и нелетального действия [1].

Информационно-компьютерные преступления, совершенные в конце XX века, буквально потрясли мир своей беспрецедентностью и размерами. В соответствии с данными, приведенными в научной литературе, размеры хищений валюты из банков США, Франции, Италии, Германии и других стран составляют десятки миллиардов долларов, марок, франков и т.д. Это один из видов преступлений и форм ведения информационно-психологической войны (ИПВ). Вид, не менее опасный, - это заражение информационными вирусами сотен и тысяч компьютеров. Целая армия специалистов во многих стран мира разрабатывает антивирусные программы, позволяющие проводить профилактику компьютерных сетей и вести борьбу против несанкционированного вторжения в сети и распространения разного рода вирусов.

В последние годы появилось научное направление – компьютерная вирусология, помогающая специалистам противостоять всевозможным компьютерным преступлениям многих странах уже создана достаточная правовая основа для противостояния таким преступлениям. Однако информационно-компьютерная индустрия (с техническими и программными средствами) развивается ускоренными темпами так, что государства и их правовые органы подчас не успевают следить за прогрессом и отстают на несколько лет в создании правовой базы ошеломительных результатов такого развития.

Это реализуется с помощью комплексного подхода в обеспечении информационной безопасности (ИБ).

При комплексном подходе к классификации видов угроз ИБ (рис.1) их можно разделить на угрозы общей направленности, которые подразделяются на следующие виды:

- угрозы конституционным правам и свободам человека и гражданина в области духовной жизни и информационной деятельности, индивидуальному, групповому и общественному сознанию, духовному возрождению России;

- угрозы информационному обеспечению государственной политики Российской Федерации;

- угрозы развитию отечественной индустрии информации, включая индустрию средств информатизации, телекоммуникации и связи, обеспечению потребностей внутреннего рынка в ее продукции и выходу этой продукции на мировой рынок, а также обеспечению накопления, сохранности и эффективного использования отечественных информационных ресурсов;

- угрозы безопасности информационных и телекоммуникационных средств и систем как уже развернутых, так и создаваемых на территории России.

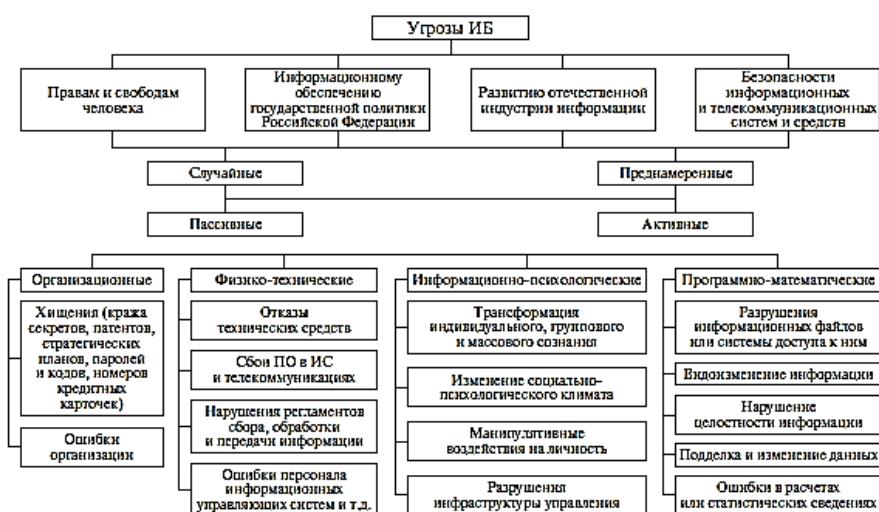


Рисунок 1 – Классификация угроз ИБ

Затем их разделяют на случайные и преднамеренные, пассивные и активные, и по конкретным направлениям на организационные физикотехнические, информационные и программно-математические [5].

Источники угроз ИБ можно подразделить на внешние и внутренние.

К *внешним источникам* угроз ИБ ИС относятся:

- деятельность иностранных политических, экономических, военных, разведывательных и информационных структур, направленная против интересов Российской Федерации и ее структурных образований в информационной сфере;

- стремление ряда стран к доминированию и ущемлению интересов России в мировом информационном пространстве, вытеснению ее с внешнего и внутреннего информационных рынков;

- обострение международной конкуренции за обладание ИТ и ресурсами;

- деятельность международных террористических организаций;

- увеличение технологического отрыва ведущих держав мира и наращивание их возможностей по противодействию созданию конкурентоспособных российских ИТ;

- деятельность космических, воздушных, морских и наземных технических и иных средств (видов) разведки иностранных государств;

- разработка рядом государств концепций информационных войн и соответствующего вооружения, предусматривающих создание средств опасного воздействия на информационные сферы других стран мира, нарушение нормального функционирования информационных и телекоммуникационных систем, сохранности информационных ресурсов (ИР), получение несанкционированного доступа к ним.

К *внутренним источникам* угроз ИБ ИС относятся:

- критическое состояние отечественных отраслей промышленности;

- неблагоприятная криминогенная обстановка, сопровождающаяся тенденциями «сращивания» государственных и криминальных структур в информационной сфере,

- получения криминальными структурами доступа к конфиденциальной информации, усиления влияния организованной преступности на жизнь общества, снижения степени защищенности законных интересов граждан, общества и государства в информационной сфере;

- недостаточная координация деятельности федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации по формированию и реализации единой государственной политики в области обеспечения ИБ РФ;

- недостаточная разработанность нормативно-правовой базы, регулирующей отношения в информационной сфере, а также недостаточная правоприменительная практика;

- неразвитость институтов гражданского общества и недостаточный государственный контроль за развитием информационного рынка России;

- недостаточное финансирование мероприятий по обеспечению ИБ РФ;

- недостаточная экономическая мощь государства;

- снижение эффективности системы образования и воспитания, недостаточное количество квалифицированных кадров в области обеспечения ИБ;

- недостаточная активность федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации в информировании общества о своей деятельности, разъяснении принимаемых решений, формировании открытых государственных ресурсов и развитии системы доступа к ним граждан;

- отставание России от ведущих стран мира по уровню информатизации федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации и органов местного самоуправления, кредитно-финансовой сферы, промышленности, сельского хозяйства, образования, здравоохранения, сферы услуг и быта граждан.

В вооруженных силах НАТО, особенно США, значительное внимание уделяется роли «несмертельного (нелетального) оружия и технологий», прежде всего информационному оружию и психолого-пропагандистским операциям в войнах XXI в., которые существенно изменяют характер

применения сухопутных, военно-воздушных и военно-морских сил и геополитического и цивилизационного противоборства основных центров формирующегося многополярного мира.

Практика показала, что наибольшие потери вооруженные силы несут при применении против них «несилового» информационного оружия, в первую очередь, от воздействия поражающих элементов, действующих на системы управления и психику человека. Информационное и консцентрическое оружие воздействует на «идеальные» объекты (знаковые системы) или их материальные носители.

В настоящее время осуществляется глобальная информационно-культурная и информационно-идеологическая экспансия Запада, осуществляя по мировым телекоммуникационным сетям (например, интернет) и через средства массовой информации. Многие страны вынуждены принимать специальные меры для защиты своих сограждан, своей культуры, традиций и духовных ценностей от чуждого информационного влияния. Возникает необходимость защиты национальных информационных ресурсов и сохранения конфиденциальности информационного обмена по мировым открытым сетям, так как на этой почве могут возникать политическая и экономическая конфронтация государств, новые кризисы в международных отношениях. Поэтому ИБ, информационная война и информационное оружие в настоящее время оказались в центре всеобщего внимания.

Информационным оружием (ИО) применительно к ИС являются средства и методы:

- уничтожения, искажения или хищения информационных массивов, прежде всего ИС;
- преодоления систем защиты КС;
- ограничения допуска законных пользователей;
- дезорганизации работы технических средств, компьютерных систем.

В основном это проявления «хакерских атак». Также *атакующим информационным оружием* в настоящее время можно назвать:

- компьютерные вирусы, способные размножаться, внедряясь в программы, передаваться по линиям связи, сетям передачи данных, выводить из строя информационные системы управления и т.д.;

- логические бомбы — программные закладные устройства, которые заранее внедряют в информационно-управляющие центры военной или гражданской инфраструктуры, чтобы по сигналу или в установленное время привести их в действие;

- средства подавления информационного обмена в телекоммуникационных сетях, фальсификация информации в каналах государственного и военного управления;

- средства нейтрализации тестовых программ в ИС;

- различного рода ошибки, сознательно вводимые противником в программное обеспечение ИС.

В докладе Объединенной комиссии по безопасности, созданной по распоряжению министра обороны и директора ЦРУ в США в июне 1993 г. и завершившей свою работу в феврале 1994 г., говорится: «...Уже признано, что сети передачи данных превращаются в поле битвы будущего. Информационное оружие, стратегию и тактику применения которого еще предстоит тщательно разработать, будет использоваться с «электронными скоростями» при обороне и нападении».

Информационные технологии позволяют обеспечить разрешение геополитических кризисов, не производя ни одного выстрела. Наша политика обеспечения национальной безопасности и процедуры ее реализации должны быть направлены на защиту наших возможностей по ведению информационных войн и на создание всех необходимых условий для воспрещения противоборствующим США государствам вести такие войны..»

Уничтожение определенных типов сознания предполагает разрушение и переорганизацию общностей, которые конституируют данный тип сознания.

Можно выделить четыре основные способы поражения и разрушения сознания в информационной войне:

1) поражение нейромозгового субстрата, снижающее уровень функционирования сознания, может происходить на основе действия химических веществ, длительного отравления воздуха, пищи, направленных радиационных воздействий;

2) понижение уровня организации информационно-коммуникативной среды на основе ее дезинтеграции и примитивизации, в которой функционирует и «живет» сознание;

3) оккультное воздействие на организацию сознания на основе направленной передачи мыслеформ субъекту поражения;

4) специальная организация и распространение по каналам коммуникации образов и текстов, которые разрушают работу сознания (условно может быть обозначено как психоэлектронное оружие).

В методологии информациологической войны происходит информационное противоборство, которое в настоящее время преобратил вид геополитического информационного противоборства (ГИП).

Геополитические технологии вооруженных воздействий можно отнести к области ГИП [5].

Целью ГИП является противостояние и противодействие информационной агрессии, а также нарушение ИБ враждебного государства. В обусловленных случаях она направлена на разрушение целостности (устойчивости) системы государственного и военного управления иностранных государств, эффективное информационное воздействие на их руководство, политическую элиту, системы формирования общественного мнения и принятия решений. Одна из важнейших целей ГИП — обеспечение ИБ РФ для завоевания информационного превосходства в мировом информационном пространстве.

Информационная борьба (в политической сфере) включает в себя три составные части:

- 1) стратегический политический анализ;
- 2) информационное воздействие;
- 3) информационное противодействие.

При этом ведение информационной борьбы осуществляется по следующим уровням:

- стратегический;
- оперативный;
- тактический.

Следует выделить два вида информационной борьбы: информационно-психологическую и информационно-техническую, которые действуют на социально-биологические и информационно-технические объекты (рис.2).



Рисунок 2 – Классификация объектов информационной борьбы.

На стратегическом уровне ГИПа в основном должны действовать высшие органы государственной власти России, а спецслужбы и крупный капитал должны действовать на оперативном и тактическом уровнях.

Воздействие — это действие, направленное на кого-нибудь с целью добиться чего-нибудь, внушить что-нибудь. В психологию под воздействием понимается целенаправленный перенос

движения и информации от одного участника взаимодействия к другому. Воздействие может быть непосредственное (контактное) и опосредованное (дистанционное, с помощью чего-либо).

Как уже отмечалось ранее, существуют определенные характеристики функционирования информации в обществе, размах циркуляции, время циркуляции, направление движения, эмоциональная окраска информации, способ переработки информации, цель переработки информации.

Именно воздействие является целью процессов переработки информации.

При ведении информационной борьбы объектами воздействия могут быть: психика людей, информационно-технические системы различного масштаба и назначения, система формирования, распространения и использования информационных ресурсов, система формирования общественного сознания (с помощью пропаганды и средств массовой информации), система формирования и функционирования общественного мнения, система принятия решений.

Объекты воздействия можно разделить на технические (в основном они находятся в сфере интересов информационно-технической борьбы) и социально-биологические (особое внимание им уделяется в ходе информационно-психологической борьбы). В роли технических объектов могут выступать системы управления и связи, финансово-экономической деятельности государства и т.д. Если же говорить о социально-биологических объектах, то к ним можно отнести отдельных индивидов, социальные группы, общество, государство, мировое сообщество, животный мир, геологические структуры и растительный мир. Основными социальными элементами общества являются социальные группы и отдельные индивиды.

Психологическое и пропагандистское воздействие является разновидностью информационно-психологического воздействия.

В связи с появлением и ускоренным развитием средств массовой информации резко усилилась роль общественного мнения, которое колossalным образом стало влиять на политические процессы в обществе, особенности функционирования информационно-психологической среды общества. Поэтому система формирования общественного мнения также является одним из основных объектов информационно-психологического обеспечения.

В тех случаях, когда информационное оружие прямо или опосредованно используется против психики человека (или социальной группы), то речь должна идти об информационно-психологической борьбе. Практически можно назвать только три объекта воздействия, каждый из которых относится к определенному типу информационной борьбы (в чистом виде): информационно-технические системы, информационно-аналитические системы (не включающие в себя человека) и информационные ресурсы.

Источники информационных опасностей могут быть естественными (объективными) и умышленными.

Информационное противоборство, также как и информационная война, включает в себя три составные части:

- 1) стратегический политический и социально-экономический анализ;
- 2) информационное воздействие;
- 3) информационное противодействие.

Рассматривая теорию информационного противоборства в политической и социально-экономической сферах, следует учитывать, что она происходит на стратегическом, оперативном и тактическом уровнях.

Информационно-психологическое воздействие представляет собой целенаправленное производство и распространение специальной информации, оказывающей непосредственное влияние (положительное или отрицательное) на функционирование и развитие информационно-психологической среды общества, психику и поведение руководства раз-личного уровня и населения России.

Психологическое и пропагандистское воздействия являются разновидностью информационно-психологического воздействия.

Суть колоссального влияния информации как раз и заключается в ее способности «точечно» контролировать социальные процессы, влиять на параметры, которые на много порядков выше самой управляющей информации. Особое значение имеет использование инфологем.

Инфологема — это ложная, искаженная или неполная информация, представляющая реальные события идеологическими мифами, политическими пропагандистскими измышлениями. Инфологемы появляются на свет как результат сознательных, целенаправленных манипулятивных воздействий или, что значительно реже, — неосознаваемых заблуждений. Инфологемы способны к расширенному самовоспроизведению, самоумно-жению. Они формируют картины мира в индивидуальном, групповом и массовом сознании, устойчивые стереотипы индивидуально и социального поведения, ценностные установки и ориентации будущих поколений.

Задача профессионала информационной войны — вовремя разглядеть инфологемы противника и своевременно отреагировать.

Большая часть социально-политических инфологем имеет две особенности:

- 1) ксенофобия, ненависть к чужому;
- 2) стремление найти врага, виновника своих бед.

В кризисных ситуациях избирательного процесса, чреватых неопределенным исходом, инфологемы выполняют следующие функции:

- 1) охранная;
- 2) аргументирующая;
- 3) комментирующая;
- 4) провозглашающая;
- 5) отвлекающая;
- 6) скрывающая;
- 7) должно ориентирующая (ориентирующая не в тех направлениях);
- 8) дезориентирующая (подменяющая ориентиры).

Информационно-манипулятивные технологии (ИМТ), их варианты и видоизменения очень разнообразны.

Для определения «ядра» технологических элементов системы манипулятивного воздействия используется комплексный критерий, который основывается на учете сочетания трех основных факторов:

- частоты использования приемов в различных манипулятивных технологиях;
- широты их применения в разнообразных информационно-коммуникативных ситуациях; человека.

С точки зрения истории справедливо отметить, что одной из первых попыток систематизации приемов ИПВ на массовое сознание с помощью пропаганды явилось описание в ряде зарубежных и отечественных источников технологий стереотипизации и «большой лжи», а также выделение следующих основных приемов ИПВ, достаточно широко известных специалистам как «азбука пропаганды»:

- «приkleивание или навешивание ярлыков» (*name calling*);
- «сияющие обобщения» или «блестательная неопределенность» (*glit-tering generality*);
- «перенос» или «трансфер» (*transfer*);
- «ссылка на авторитеты», «по рекомендации», «свидетельства» или «свидетельствование» (*testimonial*);
- «свои ребята» или «игра в простонародность» (*plain folks*);
- «перетасовка» или «подтасовка карт» (*card stacking*);
- «общий вагон», «общая платформа» или «фургон с оркестром» (*band wagon*).

Они нашли широкое применение в рекламно-пропагандистских акциях и в настоящее время как технологии ИПВ активно используются зарубежными и российскими СМИ [5].

Российские специалисты и руководители рассматривают свою деятельность в условиях реализации международных стандартов безопасности и качества продукции,

услуг и технологий, но прежде всего с учетом отечественных подходов без которых невозможно участие на высоком паритетном уровне в международном сотрудничестве, а значит, и

решение проблем устойчивого безопасного развития и экономического возрождения России. И прежде всего, рассматривается комплекс различных угроз и воздействий целенаправленного оружейного характера, которые могут привести к нарушениям жизни населения страны, государства и его сообществ.

Здесь целесообразно рассмотреть комплекс воздействий военных технологий, которые в настоящее время уже практически апробированы, и которые могут быть в перспективе реализованы при возникновении военных конфликтов.

Возможности развития человеческого разума и создание технологий вооруженных взаимодействий при ведении войн очень многообразны, и они лежат в основе эволюции человечества. Схема классификации технологий оружейных взаимодействий приведена на рис.3.

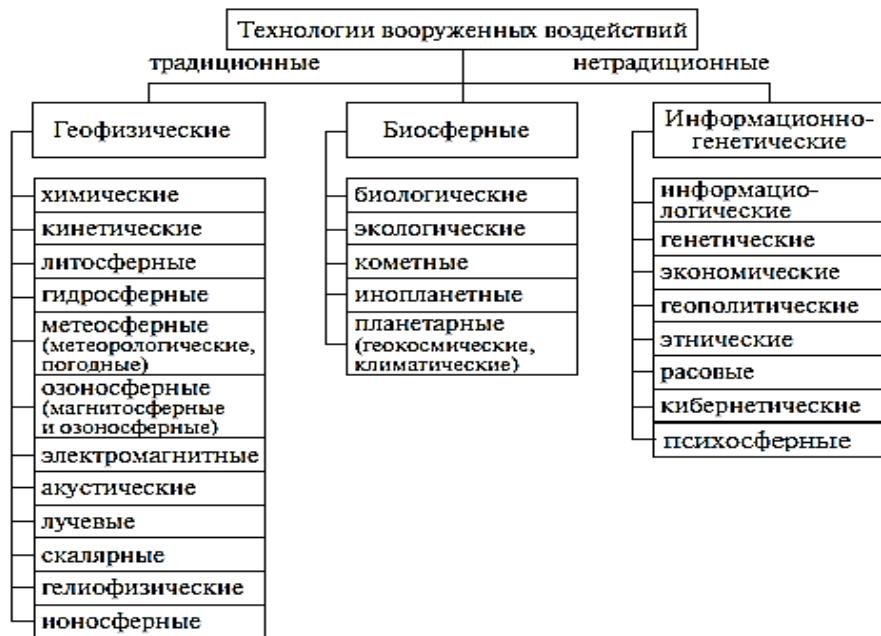


Рисунок 3 – Классификационная схема технологий оружейных воздействий в Земном сообществе.

Ряд специалистов даже выделяют семь поколений вооруженных взаимодействий (войн). Они определяются историческими аспектами ведения войн. Так в истории развития человечества необходимо выделить.

Технологии генетических, этнических и расовых оружейных воздействий. В настоящее время в БЖД большие надежды возлагаются на новое направление биологической науки — **генную инженерию**. Изучая и практически осваивая в лабораторных условиях процессы эволюции генетического материала, ученые уже научились надежно получать белки и другие биотехнологические продукты с заранее заданными свойствами. В том числе и избирательно действующие вирусы. В эту работу уже давно и активно включились такие страны, как США, СССР (а сейчас и Россия), Китай, Япония, Иран, ряд стран Западной Европы... и небезуспешно. Модифицированные с помощью генной инженерии микроорганизмы, штаммы бактерий, вирусов, а также специально сконструированные молекулы нуклеиновых кислот могут воздействовать на организмы людей избирательно — например, в зависимости от пола, возраста, антропологических особенностей. К примеру, к концу 1970-х гг. эффективность избирательного «срабатывания» генетически модифицированных вирусов в зависимости от заданного пола и возраста достигла 90%. А это уже новое поколение высокоточного биологического оружия — **генетическое оружие**. Под этим термином сегодня понимают вещества химического или биологического происхождения, способные вызывать в человеческом организме мутации (изменения структуры) генов, сопровождающиеся нарушением здоровья или запрограммированным поведением людей.

Американский специалист по **психогеномике** Джон Логан Блек считает: «*В геномных и генотерапевтических исследованиях имеется и военный аспект. Они дают возможность создать новый вид биологического оружия — так называемого геномного*». Это мнение поддерживают и ряд других ученых: сегодня, после расшифровки генома, подобное оружие уже правильнее называть не генетическим, а **геномным**. Ведь его действие направлено не просто на гены, а на более мелкие структуры — полиморфизмы и их специфические сочетания. Появилось даже целое научное направление, которое занимается изучением генетических характеристик различных этносов — **этногеномика**.

По сути дела, на наших глазах рождается новое оружие воздействия на человека, имеющее избирательное действие по определенным расовым или этническим группам. Это уже не просто генетическое оружие, это оружие более страшное — **этническое** (расовое). Применение такого оружия, например, в мегаполисе или регионе с многонациональным населением, сначала совершенно незаметное, через некоторое время начнет негативноказываться на здоровье отдельных этнических групп, приводя к постепенному вымиранию конкретного этноса [1,3].

Впрочем, разработчики генетического оружия не теряют надежды освоить высокоточные, «прицельные» технологии и ведут в этом направлении активную работу. И не столь уж безобидными могут оказаться активные исследования этнических групп (вплоть до ДНК), которые проводятся по всему миру ведущими западными научными центрами. Военно-политическое руководство США рассматривает это оружие под углом своей основной задачи: обеспечить главным образом выживание белого англоязычного населения. Не на последнем месте стоит и задача медико-биологического оздоровления нации, в том числе концепция «искусственного отбора человека». Основы ее были заложены еще более ста лет назад, в период увлечения евгеникой — прикладной наукой, призванной улучшать природу человека, чем активно влиять на эволюцию человечества. Сбываются мечты «мировой элиты» по избирательному уничтожению «избыточного» населения планеты.

Бывший руководитель Южноафриканского центра химической и биологической войны доктор **Даан Гузен** не так давно признался, что еще в середине 1980-х гг. его центр получил заказ на разработку «оружия по цвету кожи», нацеленного против чернокожих. Со своими коллегами он тогда обсуждал распространение болезни через пиво, кукурузу, прививки... Однако уровень знаний того времени в области генетики якобы не позволил тогда выполнить заказ. Позднее «Файненшнл Таймс» сообщила, что в ЮАР наконец прекращены работы по разведению бактерий, способных делать людей с черной кожей бесплодными. При этом не уточняется, по какой причине прекращены эти разработки. По гуманной? А может, они просто удачно завершены?

Известно, что не только ЮАР, но и другие страны активно работают над созданием генетического оружия. В 1998 г. бывший министр обороны США **Уильям Коэн** сделал сенсационные заявления о том, что в его распоряжении имеются материалы о работах по созданию «определенных типов патогенов, которые могли бы быть этническим оружием». Высоко-поставленный западный источник из разведывательных кругов сообщил, что в число стран, которые имел в виду Коэн, входит и Израиль.

Но самым эффективным и «долгоиграющим» оружием считаются **трансгенные продукты**. Ученые предполагают, что в недалеком будущем генная инженерия позволит массово производить новый вид вооружения — токсичные продукты питания избирательного действия. Войны в ее традиционном понимании не будет. Для доставки такого вирусного оружия не нужны будут ни бомбы, ни ракеты. Гены-агрессоры могут встраиваться в пищевые растения, а через них — в популярные продукты питания. Вирус можно будет поместить, например, в какой-нибудь экспортный по всему миру пищевой продукт. И хотя потреблять его будут все, разрушительное воздействие он будет оказывать только на определенную категорию людей.

В отдельную категорию можно выделить **пищевые добавки**, ориентированные на привычки, традиции и другие особенности образа жизни населения того или иного государства.

Опасность генетически модифицированных организмов (ГМО) и трансгенных продуктов кроется не только в их возможной «боевой» запрограммированности, но и в невыясненных до конца принципах работы генетического механизма человека. Уже сейчас ясно, что гены в организме

разных этнических групп взаимодействуют друг с другом, а тем более с чужеродными генами, по-разному: «*Что русскому хорошо, то немцу смерть*» (и наоборот).

Многообразие оружейных технологий согласно «Классификационной схеме технологий вооруженных воздействий в Земном сообществе» (рис.3) не позволяет охарактеризовать и описать их возможности в оружейных взаимодействиях, и поэтому целесообразно отнести читателям ознакомлению изданий [1 и 3], приведенных в ссылках на литературу данной статьи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников В.П. Безопасность жизнедеятельности. Учебник для ВУЗов. М.: Изд. «Курс», 2017.
2. Слипченко В.И. Войны шестого поколения. Оружие и военное искусство будущего. М.: «Вече», 2002.
3. Правдинцев В.Л. Тайные технологии. Биосферное и геосферное оружие. М.: «Бином», 2012.
4. Сидоров Г.А. Хронолого-эзотерический анализ развития современной цивилизации. Истоки занятия. Научн.поп.изд. Кн.2. М.: «Академия управления», 2009.
5. Мельников В.П., Куприянов А.И., Васильева Т.Ю. Информационная безопасность. Учебник для ВУЗов. М.: Изд. «КНОРУС», 2016 (Бакалавриат).

Олейников Константин Анатольевич, Катилевская Ирина Юрьевна

Южного федерального университета

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСИРУЮЩИМ РОБОТОМ

Аннотация. В ходе выполнения работы была рассмотрена математическая модель объекта управления – балансирующего робота, а также продемонстрирована ее работоспособность. Был осуществлен анализ различных современных методов управления балансирующим роботом. Проведен синтез системы методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Приводится результат моделирования данного регулятора, с использованием компьютерных программных средств, а также показано сравнение результатов моделирования методом АКАР и результатов моделирования с использованием классических методов управления.

Ключевые слова: Стабилизация, балансирующий робот, перевернутый маятник, управление, система, устойчивость, гироскоп, акселерометр, переходной процесс, акар, управляющее воздействие.

Annotation. This paper work is devoted to the creation of a balancing robot control system. In the course of the work, the mathematical model of the object was considered, and its performance was demonstrated. An analysis was made of various modern methods of controlling the balancing robot. The system was synthesized by the method of analytical design of aggregated regulators (ADAR). The result of modeling of this regulator is presented, using computer software, as well as comparison of modeling results by AKAR and modeling results with using classic control methods.

Keywords: Stabilization, balancing robot, inverted pendulum, control, system, stability, gyroscope, accelerometer, transient, cancer, control.

Введение

Робототехника является многозначащей технологией в современном мире. На сегодняшний день использование роботов в нашей жизни становится все более значимым для человеческих потребностей, современного образа жизни. Роботы стали неотъемлемой частью производства и автоматизации [1, 2].

Балансирующий робот – это нелинейная неустойчивая система, которая может служить для отработки и сравнения различных алгоритмов управления. Многие неустойчивые системы содержат звенья, представляющие собой перевернутый маятник: транспортное средство Segway, двуногие шагающие механизмы, экзоскелеты [3,4].

Описание объекта

Робот, рассмотренный в данной работе, имеет одну степень свободы, поскольку может перемещаться поступательно в направлении вращения колес.

Устройство представляет собой платформу, на которой расположена управляющая электроника робота и датчики. К самой платформе жестко фиксируется статор сервомотора. Сервомотор задает движение колес робота, которые размещены на его валу. На роторе двигателя закреплены колеса [5, 6].

Ядро данной системы представляет собой микроконтроллер STM32F100RBT6, установленный на отладочной плате [2]. Управление системой полностью осуществляется данным микроконтроллером.

В качестве датчика угла наклона в балансирующем роботе чаще всего применяется модуль MPU6050. Этот модуль включает в себя трехосевые гироскоп и акселерометр и может быть применен для определения не только угла наклона, но и угловой скорости [3].

Данное устройство является неустойчивым в обесточенном состоянии и считается классическим случаем перевернутого маятника на колесе.

Описание математической модели балансирующего робота

Согласно кинематической схеме, изображенной на рисунке 1, балансирующий робот представляет собой «кирпич» на колесах.

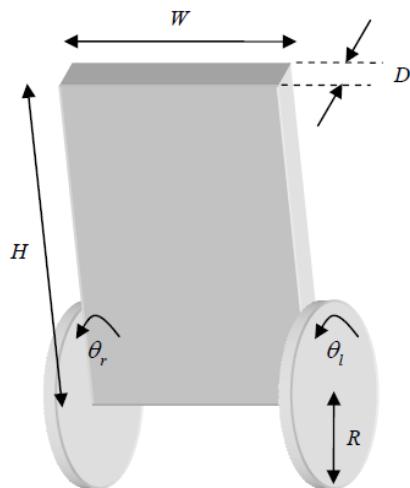


Рисунок 1 – Двухколесный перевернутый маятник

Перед тем, как приступать к описанию математической модели необходимо ввести оставшиеся неизвестные параметры математической модели системы, которые указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Физические параметры робота

Параметр	Единицы измерения	Физический смысл
$g = 9.81$	[м/сек ²]	Ускорения свободного падения
$m = 0.03$	[кг]	Вес колеса
$R = 0.04$	[м]	Радиус колеса
$J_w = \frac{mR^2}{2}$	[кг*м ²]	Момент инерции колеса
$M = 0.6$	[кг]	Масса робота
$W = 0.14$	[м]	Ширина робота
$D = 0.04$	[м]	Глубина робота
$H = 0.144$	[м]	Высота робота
$L = \frac{H}{2}$	[м]	Расстояние от центра масс робота до центра масс колес
$J_\psi = \frac{ML^2}{3}$	[кг*м ²]	Момент инерции робота при наклоне
$J_\phi = \frac{M(W^2 + D^2)}{12}$	[кг*м ²]	Момент инерции при повороте
$J_m = 10^{-5}$	[кг*м ²]	Момент инерции ротора двигателя
$R_m = 6.69$	[Ом]	Сопротивление обмотки двигателя
$K_b = 0.468$	[В*сек/рад]	Коэффициент противоЭДС
$K_t = 0.317$	[Н*м/А]	Коэффициент передачи по току
$n = 1$		Коэффициент передачи редуктора

$f_m = 0.0022$	Коэффициент вязкого трения в моторе
$f_w = 0.002$	Коэффициент трения между колесом и полом

Для описания математической модели робота следует рассмотреть объект в проекции на оси, представленный на рисунке 2.

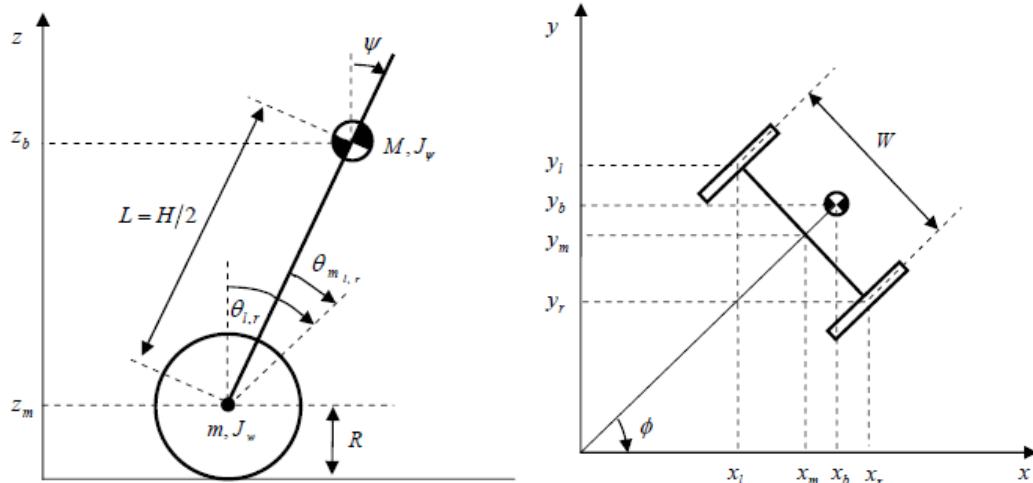


Рисунок 2 – Вид сбоку и вид сверху

Математическая модель данного объекта получена с помощью уравнений Лагранжа второго рода, которые выведены на основе системы координат [7].

$$(x_m, y_m, z_m) = (R\theta \cos \phi, R\theta \sin \phi, R); \quad (1)$$

$$(\theta, \phi) = \left(\frac{1}{2}(\theta_l + \theta_r), \frac{R}{W}(\theta_r - \theta_l) \right); \quad (2)$$

$$(x_l, y_l, z_l) = \left(x_m - \frac{W}{2} \sin \phi, y_m + \frac{W}{2} \cos \phi, z_m \right); \quad (3)$$

$$(x_r, y_r, z_r) = \left(x_m + \frac{W}{2} \sin \phi, y_m - \frac{W}{2} \cos \phi, z_m \right); \quad (4)$$

$$(x_b, y_b, z_b) = (x_m + L \sin \psi \cos \phi, y_m + L \sin \psi \sin \phi, z_m + L \cos \psi). \quad (5)$$

Выражения (1) – (5) описывают каждую координату, т.к. направление двухколесного перевернутого маятника принимается положительным, относительно оси x: -

$$T_1 = \frac{1}{2} (\dot{x}_l^2 + \dot{y}_l^2 + \dot{z}_l^2) + \frac{1}{2} m (\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2 + \dot{z}_r^2) + \frac{1}{2} M (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2); \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_2 = & \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}_l^2 + \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2} J_\psi \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} J_\phi \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} n^2 J_m (\dot{\theta}_l - \dot{\psi})^2 + \\ & + \frac{1}{2} n^2 J_m (\dot{\theta}_r - \dot{\psi})^2; \end{aligned} \quad (7)$$

$$U = mgz_l + mgz_r + Mgz_b. \quad (8)$$

Уравнения для кинетической энергии поступательного движения T_1 , кинетической энергии вращательного движения T_2 и потенциальной энергии U можно выразить формулами (6) – (8):

$$L = T_1 + T_2 - U. \quad (9)$$

Выражение (9) – функция Лагранжа L.

Принято считать, что колеса крутятся без проскальзывания, поэтому положение робота в пространстве описывается тремя независимыми переменными: θ_l , θ_r , ψ , где $\theta_{l,r}$ – углы поворота колес, ψ – угол наклона робота.

Но, так как в данной работе исследуется только поступательное движение робота, то $\theta_l = \theta_r$. Из этого следует вывод, что модель будет состоять из двух уравнений движения.

Уравнения Лагранжа выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} &= F_\theta; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} &= F_\psi. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив полученные выражения (6) – (9) в (10), уравнения движения тележки на колесах примут вид:

$$\begin{aligned} [(2m + M)R^2 + 2J_\psi + 2n^2 J_m + 2n^2 J_m] \ddot{\theta} + \\ + (MLR \cos \psi - 2n^2 J_m) \ddot{\psi} - MLR \dot{\psi}^2 \sin \psi &= F_\theta; \\ (MLR \cos \psi - 2n^2 J_n) \ddot{\theta} + (ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m) \ddot{\psi} - MgL \sin \psi &= F_\psi; \end{aligned} \quad (11)$$

где $\dot{\theta}$ – угловая скорость колес робота, $\dot{\psi}$ – скорость угла наклона корпуса робота, $\ddot{\theta}$ – угловое ускорение колес, $\ddot{\psi}$ – угловое ускорение корпуса робота.

В левой части уравнений (11) описана динамика объекта, его инерция, а в правой части внешние моменты, действующие по направлениям θ и ψ

$$F_g = MgL\theta; \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{nK_t}{R_m}; \quad (13)$$

$$\beta = \frac{nK_t K_b}{R_m} + f_m. \quad (14)$$

Прежде всего, на робота действует момент силы тяжести, как и в случае перевернутого маятника (12). Со стороны двигателя на робота влияет три момента. Это момент тяги, пропорциональный питающему напряжению (13), и два демпфирующих момента (14) – момент, наведенный противоЭДС, имеющий электрическую природу, и момент вязкого трения в двигателе. Оба момента пропорциональны скорости колес, относительно корпуса робота, $\dot{\theta}$. Также учитывается момент вязкого трения между колесами и полом, пропорциональный скорости колес $\dot{\theta}$.

В результате на колеса робота действуют моменты двигателя и моменты трения по пол, а на корпус робота влияют тот же момент двигателя с отрицательным знаком и момент силы тяжести:

$$F_\theta = \frac{\alpha}{2} v - (\beta + f_w) \dot{\theta} + \beta \dot{\psi}; \quad (15)$$

$$F_\psi = -\alpha v + 2\beta \dot{\theta} - 2\beta \dot{\psi}. \quad (16)$$

Подставляя полученные моменты (15), (16) в уравнения динамики (11), формула принимает следующий вид:

$$\begin{cases} [(2m+M)R^2 + 2J_w + 2n^2 J_m + 2n^2 J_m] \ddot{\theta} + (MLR\cos\psi - 2n^2 J_m) \ddot{\psi} - \\ - MLR\dot{\psi}^2 \sin\psi = \frac{\alpha}{2}v - (\beta + f_w)\dot{\theta} + \beta\dot{\psi}; \\ (MLR\cos\psi - 2n^2 J_n) \ddot{\theta} + (ML^2 + J_w + 2n^2 J_m) \ddot{\psi} - \\ - MgL\sin\psi = -\alpha v + 2\beta(\dot{\theta} - \dot{\psi}). \end{cases} \quad (17)$$

Система уравнений (17) представляет собой нелинейные уравнения, составляющие математическую модель балансирующего робота.

Синтез системы управления балансирующим роботом

В данной работе будет рассмотрен метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Данный метод является нетрадиционным с точки зрения классической теории автоматического управления (ТАУ). Для того, чтобы оценить работу регулятора, синтезированного методом АКАР, осуществлен синтез закона управления с помощью линейно-квадратичного регулятора и проведено сравнение полученных результатов между собой.

Синтез балансирующего робота с линейно-квадратичным регулятором

Для построения системной модели робота [8] необходимо линеаризовать итоговые уравнения движения робота (17):

$$\begin{aligned} [(2m+M)R^2 + 2J_w + 2n^2 J_m] \ddot{\theta} + (MLR - 2n^2 J_m) \ddot{\psi} &= F_\theta; \\ (MLR - 2n^2 J_m) \ddot{\theta} + (ML^2 + J_w + 2n^2 J_m) \ddot{\psi} &= F_\psi. \end{aligned} \quad (18)$$

Для удобства вычислений уравнения (18) следует записать в матричном виде:

$$E \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} v \\ v \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$E = \begin{bmatrix} (2m+M)R^2 + 2J_w + 2n^2 J_m & MLR - 2n^2 J_m \\ MLR - 2n^2 J_m & ML^2 + J_w + 2n^2 J_m \end{bmatrix},$$

$$F = 2 \begin{bmatrix} \beta + f_w & -\beta \\ -\beta & \beta \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -MgL \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} \alpha & \alpha \\ -\alpha & -\alpha \end{bmatrix}.$$

Матричное уравнение (19) имеет 4 независимых переменных – $\theta, \psi, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ и его можно записать в следующем виде:

$$E \begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

Домножив уравнение (20) на E^{-1} , оно примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = -E^{-1}F \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} - E^{-1}G \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + -E^{-1}H \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Для получения итоговых матриц A, B, C, D необходимо ввести еще одно выражение (21):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

С учетом выражений (21) и (22) без труда можно выразить необходимые матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -E^{-1}G & 0 & -E^{-1}F & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -E^{-1}H & 0 \end{bmatrix}, C = [1], D = [0] \quad (23)$$

Таким образом, модель балансирующего робота в пространстве состояний представляет собой: 4 уравнения, 1 вход и 4 выхода.

Для построения системной модели балансирующего робота необходимо использовать программное средство Matlab Simulink. Схема балансирующего робота представлена на рисунке 3.

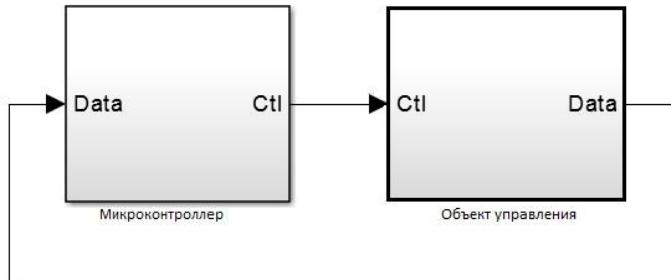


Рисунок 3 – Системная модель балансирующего робота

Модель объекта управления, изображенная на рисунке 4, представляет собой модель пространства состояний, т-функцию и блоки, используемые для снятия показаний с датчиков:

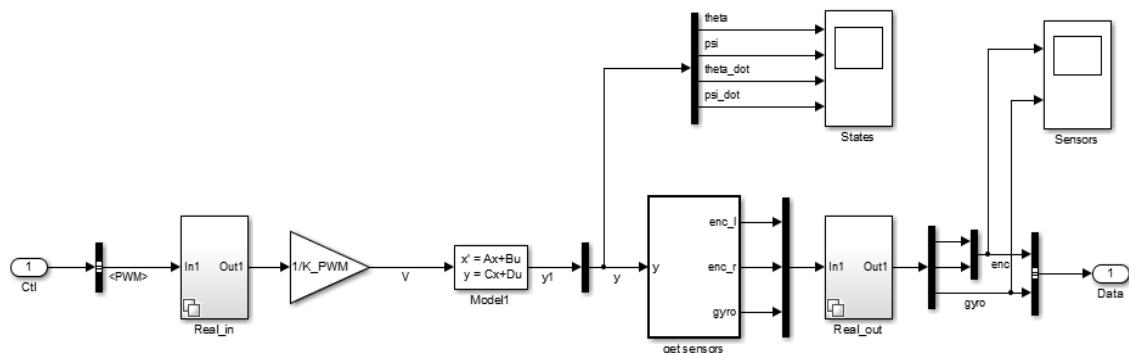


Рисунок 4 – Модель объекта управления

В микроконтроллер приходят показания с датчиков: сигналы с энкодеров и гироскопа. Для того, чтобы получить данные в виде состояний, необходимо перевести сигналы из градусов в радианы.

Удобство применения линейно-квадратичного регулятора в системной модели линейно-квадратичного регулятора обуславливается тем, что в Matlab имеется встроенная функция LQR, позволяющая сразу же применять ее в модели.

Структурная схема микроконтроллера представлена на рисунке 5.

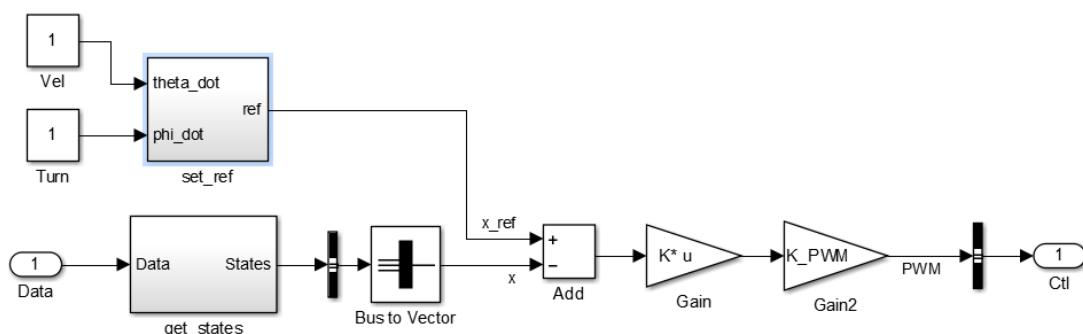


Рисунок 5 – Структурная схема микроконтроллера

Синергетический синтез закона управления двухколесного балансирующего робота методом АКАР

В основе процедуры лежит метод АКАР, опирающийся на идею введения притягивающих инвариантных многообразий (ИМ) $\psi_s(x_1, \dots, x_n) = 0$.

Для проведения синтеза математической модели робота необходимо преобразовать полученную систему уравнений (17) в следующий вид

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{\frac{\alpha}{2}v - (\beta + f_w)\dot{\theta} + \beta\dot{\psi} - (MLR\cos\psi - 2n^2J_m)\ddot{\psi} - MLR\dot{\psi}^2\sin\psi}{(2m + M)R^2 + 2J_\psi + 2n^2J_m}; \\ \ddot{\psi} = \frac{-\alpha v + 2\beta(\dot{\theta} - \dot{\psi}) - (MLR\cos\psi - 2n^2J_n)\ddot{\theta} + MgL\sin\psi}{ML^2 + J_\psi + 2n^2J_m}. \end{cases} \quad (24)$$

Для удобства работы с полученной моделью вводится замена физических величин на коэффициенты:

$$\begin{aligned} k_1 &= J_m; k_2 = 2n^2J_m; k_3 = J_\psi; k_4 = m; k_5 = \beta; k_6 = f_w; \\ k_7 &= L; k_8 = M; k_9 = R; k_{10} = g; k_{11} = \alpha. \end{aligned} \quad (25)$$

В результате замены (25) система (26) представляет собой следующие выражения:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= \frac{va_8(\frac{1}{2}a_3 - 1) + \dot{\theta}(2a_5 - a_3(a_5 + a_6)) + \dot{\psi}(a_3a_5 - 2a_5)}{a_1a_3 + a_2\cos\psi - a_7} + \\ &\quad + \frac{a_4\sin\psi + a_2a_3\dot{\psi}^2\sin\psi}{a_1a_3 + a_2\cos\psi - a_7}; \\ \ddot{\psi} &= \frac{va_8(-a_1 - \frac{1}{2}a_2\cos\psi + \frac{1}{2}a_7) + \dot{\theta}(2a_1a_5 + (a_2\cos\psi - a_7)(a_5 + a_6))}{a_1a_3 + (a_2\cos\psi - a_7)^2} - \\ &\quad - \frac{\dot{\psi}(2a_5a_1 + a_2a_5\cos\psi - a_5a_7) - \dot{\psi}^2a_2\sin\psi(a_2\cos\psi - a_7) + a_1a_4\sin\psi}{a_1a_3 + (a_2\cos\psi - a_7)^2}, \end{aligned} \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= (2k_4 + k_8)k_9^2 + k_1 + k_2; a_2 = k_7k_8k_9; a_3 = k_7^2k_8 + k_3 + k_2; a_4 = k_7k_8k_{10}; \\ a_5 &= k_5; a_6 = k_6; a_7 = k_2; a_8 = k_{11}. \end{aligned}$$

Данная замена (26) была произведена во избежание излишней громоздкости.

Для записи конечной системы уравнений, описывающих объект, необходимо заменить независимые переменные модели на переменные, дифференцируемые по времени. В качестве управляющего воздействия выступает напряжение, подаваемое на колеса робота.

$$\begin{aligned}
\theta &= x_1 \\
\psi &= x_3 \\
\dot{\theta} &= x_2 \\
\dot{\psi} &= x_4 \\
\ddot{\theta} &= \dot{x}_2 \\
\ddot{\psi} &= \dot{x}_4 \\
v &= u
\end{aligned} \tag{27}$$

С учетом выражений (26) и (27) система уравнений представлена в форме Коши:

$$\left\{
\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2; \\
\dot{x}_2 &= \frac{a_8 u (\frac{1}{2} a_3 - 1) + x_2 (2a_5 - a_3(a_5 + a_6)) + x_4 (a_3 a_5 - 2a_5)}{a_1 a_3 + a_2 \cos x_3 - a_7} + \\
&\quad + \frac{a_4 \sin x_3 + a_2 a_3 x_4^2 \sin x_3}{a_1 a_3 + a_2 \cos x_3 - a_7}; \\
\dot{x}_3 &= x_4; \\
\dot{x}_4 &= \frac{u a_8 (-a_1 - \frac{1}{2} a_2 \cos x_3 + \frac{1}{2} a_7) + x_2 (2a_1 a_5 + (a_2 \cos x_3 - a_7)(a_5 + a_6))}{a_1 a_3 + (a_2 \cos x_3 - a_7)^2} - \\
&\quad - \frac{x_4 (2a_5 a_1 + a_2 a_5 \cos x_3 - a_5 a_7) - x_4^2 a_2 \sin x_3 (a_2 \cos x_3 - a_7) + a_1 a_4 \sin x_3}{a_1 a_3 + (a_2 \cos x_3 - a_7)^2}.
\end{aligned} \right. \tag{28}$$

Инвариантом для системы (28) является уравнение:

$$x_3 = x_{3_0}. \tag{29}$$

Для динамического объекта, описанного уравнениями (29) ставится задача синтеза закона управления: необходимо определить такое u , которое обеспечивает стабилизацию угла наклона робота (29).

Согласно процедуре синтеза метода АКАР вводится макропеременная, отражающая желаемый инвариант системы:

$$\psi = x_4 - k(x_3 - x_{3_0}). \tag{30}$$

Макропеременная (30) должна удовлетворять решению основного функционального уравнения метода АКАР, которое имеет вид:

$$T_n \dot{\psi}_n(t) + \psi_n = 0. \tag{31}$$

Согласно (31) вычисляется функциональное уравнение для (30):

$$\begin{aligned}
T \dot{\psi}(t) + \psi &= T \left(\frac{-k u a_8 (-a_1 - \frac{1}{2} a_2 \cos(x_3) + \frac{1}{2} a_7)}{a_1 a_3 + (a_2 \cos(x_3) - a_7)^2 + x_4} + \right. \\
&\quad + \frac{-k (x_2 (2a_1 a_5 + (a_2 \cos(x_3) - a_7)(a_5 + a_6)))}{a_1 a_3 + (a_2 \cos(x_3) - a_7)^2 + x_4} - \\
&\quad - \frac{k (x_4 (2a_1 a_5 + a_2 a_5 \cos(x_3) - a_5 a_7))}{a_1 a_3 + (a_2 \cos(x_3) - a_7)^2 + x_4} - \\
&\quad \left. - \frac{-k (x_4^2 (a_2 \cos(x_3) - a_7) a_2 \sin(x_3) + a_1 a_4 \sin(x_3))}{a_1 a_3 + (a_2 \cos(x_3) - a_7)^2 + x_4} \right) + \\
&\quad + x_4 - k(x_3 - x_{3_0}) = 0
\end{aligned} \tag{32}$$

и находится управление u соответственно (32).

Сравнение результатов исследования

В данной главе были приведены результаты компьютерного моделирования замкнутой системы регулятора, синтезированного методом АКАР, и линейно-квадратичного регулятора. Для сравнения данных методов, достаточно рассмотреть графики переходных процессов при $\psi_0 = 0.2$ рад, $\psi_0 = -0.2$ рад, представленные на рисунках 6, 7.

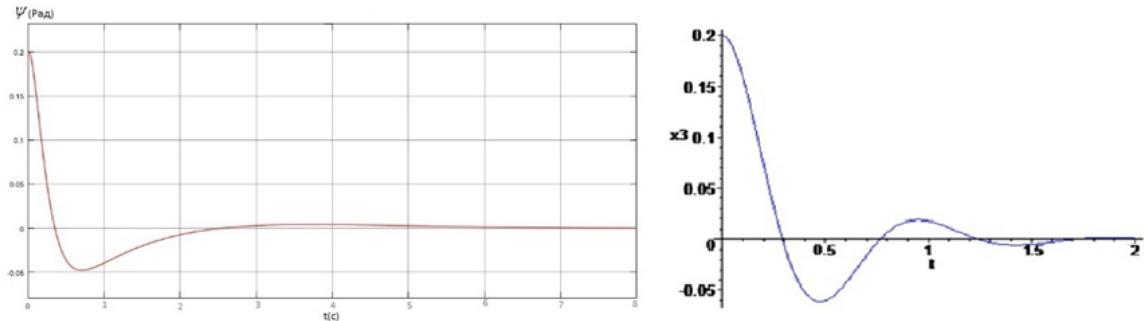


Рисунок 6 – Графики изменения угла наклона робота при $\psi_0 = 0.2$:
слева – LQR, справа – АКАР

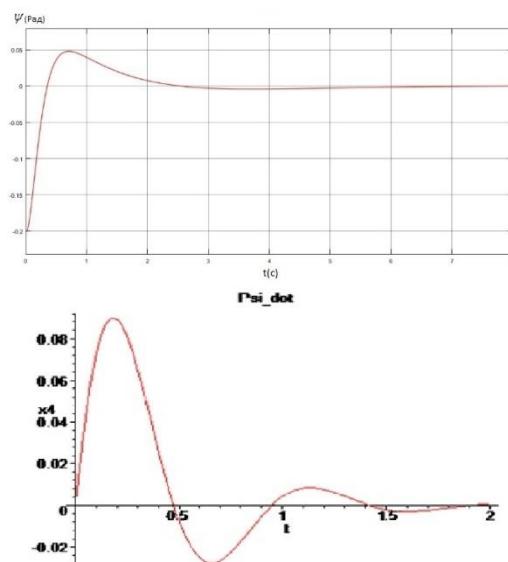


Рисунок 7 – Графики изменения угла наклона робота при $\psi_0 = -0.2$:
вверху – LQR, внизу – АКАР

Исследуя полученные результаты, можно сразу заметить, что и один и второй метод приводят систему в желаемое значение. Время переходного процесса у регулятора, синтезированного методом АКАР, составляет 2 секунды, в то время как система управления с LQR стабилизируется в отметке 6 секунд.

Стоит также отметить, что в переходных процессах, изображенных в нижней части рисунка наблюдаются затухающие колебания с малой амплитудой, что удовлетворяет необходимым качествам системы. А также демонстрируется модель, более приближенная к реальным условиям.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы было выполнено исследование двухколесного балансирующего робота. Были рассмотрены основные понятия, физические

особенности объекта, принцип его работы. При рассмотрении математической модели балансирующего робота были определены основные нелинейные уравнения, описывающие динамику объекта. Было проведено компьютерное моделирование разомкнутой системы робота, показывающее адекватность математической модели.

Для оценки работоспособности регулятора, синтезированного методом АКАР, было проведено компьютерное моделирование в среде Maple. Из полученных результатов видно, что переменные достигают заданный инвариант за короткий промежуток времени, следовательно, синтезированный регулятор работает верно. Кроме того, были получены графики переходных процессов переменных состояния, и проведено сравнение полученных результатов с результатами моделирования замкнутой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юревич, Е.И. Управление роботами и робототехническими системами [Текст] / Е.И. Юревич. – СПб.: СПбГТУ, 2000. – 171 с.
2. Любомир, В.Д. Уточнение модели балансирующего робота логико-эмпирическим методом [Текст] / В.Д. Любомир, В.А. Жмудь, А.Ю. Ивойлов // Научный журнал КубГАУ. – 2016 – № 121 (07). – С. 2 – 10.
3. Бобцов, А.А. Алгоритм управления автономным двухколесным мобильным роботом «Мотобот» [Текст] / А.А. Бобцов, А.С. Боргуль, К.А. Зименко // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – №5. – С. 57 – 60.
4. Корнилков А.Н. Разработка системы управления «Сегвей» на базе адаптивного нечеткого регулятора [Текст] / А.Н. Корнилков, Н.Г. Липатников, Ю.Н. Хижняков // Вестник ПНИПУ. – 2016. – №19. – С. 70 – 79.
5. Sung, H.C. Balancing robot control and implementation [Text] / H.C. Sung // Master thesis. – 2015. – Pp. 13-17.
6. Sundin, C.D. Autonomous balancing robot [Text] / C.D. Sundin, F.A. Thorstensson // – Goteborg: Department of Signals and Systems Chalmers University of Technology, 2012. – 78 p.
7. Yamamoto, Y. NXTway-GS Model-Based Design - Control of self-balancing two-wheeled robot built with LEGO Mindstorms NXT [Text] / Y. Yamamoto // Application Engineer. – 2008. – Pp. 7-11.
8. Prasad, L.B. Modeling simulation for optimal control of nonlinear inverted pendulum dynamical system using PID controller & LQR [Text] / L.B Prasad, B.A. Tyagi, H.O. Gupta // Proceedings - 6th asia international conference on mathematical modelling and computer simulation. – 2012. – №10. – Pp. 138 – 143.

Попов Андрей Николаевич

Южный федеральный университет

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СЛЕДЯЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Аннотация. В докладе рассматривается применение принципов и методов синергетической теории управления для синтеза автоматических регуляторов, обеспечивающих решение задачи слежения. Представлено несколько вариантов проведения процедуры синергетического синтеза следящих регуляторов. Предлагаемые подходы иллюстрируются примерами. Теоретические выводы подтверждаются компьютерным моделированием замкнутых систем.

Ключевые слова: следящие системы автоматического управления, синергетический синтез регуляторов.

Annotation. Paper is devoted to the usage of synergetic control theory for synthesis of automatic closed loop servosystems. The several variants of synergetic synthesis of automatic closed loop servosystems are present. Proposed approaches are illustrated by examples. Theoretical conclusions are confirmed by computer simulation of closed loop systems.

Keywords: automatic closed loop servosystems, synergetic feedback synthesis.

Следящие системы принято выделять в отдельный класс систем автоматического управления. В отличие от наиболее распространенных систем стабилизации, выполняющих задачу удержания управляемых переменных в заданном постоянном значении, следящие системы должны обеспечивать изменение управляемой переменной $x^{(upr)}$ в соответствии с некоторым временным сигналом $g(t)$, поступающим на вход системы. Это входной сигнал рассматривается как задающее воздействие, являющееся априори неизвестной функцией времени. Задача следящей системы

$$|g(t) - x^{(upr)}| \leq \varepsilon$$

состоит в воспроизведении входного сигнала с заданной точностью: .

В настоящее время при проектировании следящих систем в основном используются подходы классической теории автоматического управления, использующие линейное или линеаризованное математическое описание управляемых процессов. Применение т.н. «частотных» методов анализа и синтеза позволяет решать задачу слежения при заданном порядке астатизма системы по входному воздействию. Разумеется, такие методы неприменимы в тех случаях, когда динамика управляемой системы является существенно нелинейной.

Синергетическая теория управления [1, 2] дает эффективные методы синтеза регуляторов для управления многомерными и нелинейными объектами. Эти методы успешно применялись при проектировании систем управления объектами различной природы и назначения [3, 4]. При этом, синтезированные регуляторы решали задачу стабилизации управляемой переменной, либо задачу генерации колебаний управляемой переменной. В работе [5] представлено решение задачи синергетического синтеза регуляторов, обеспечивающих воспроизведение заданного временного сигнала (периодического или хаотического), и предполагающих введение генераторов эталонного сигнала в структуру замкнутой системы. При этом считалось, что характеристики временного сигнала априори определены, а его динамика может быть описана соответствующими дифференциальными уравнениями.

В этой связи, данную статью можно рассматривать как первую попытку использования принципов и методов синергетической теории управления для решения синтеза следящих систем автоматического управления в ее общепринятой постановке. Ниже будут изложены два варианта проведения процедуры синергетического синтеза следящих регуляторов. Первый из них предполагает вычисление производных входного сигнала по времени, во втором случае используются идея расширения пространства состояния управляемой системы и методика построения асимптотических наблюдателей.

1. Синтез следящего регулятора с дифференцированием входного сигнала

Сформулируем задачу синтеза следящего регуляторов, предполагая, что объект имеет один канал управления и необходимо обеспечить слежение за одним входным сигналом.

Пусть динамика управляемого объекта описывается системой обыкновенных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, u, g), \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор переменных состояния системы, u – управляющее воздействие, $g = g(t)$ – задающее воздействие.

Требуется найти $u = u(\mathbf{x}, g)$, обеспечивающее асимптотическое схождение управляемой

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x^{y_{np}} - g(t)) = 0$$

переменной к задающему входному сигналу:

Методы синергетического синтеза основаны на идее введения притягивающих инвариантных многообразий $\psi_i(\mathbf{x}) = 0$ в пространстве состояний управляемой системы. Закон управления в скалярном случае (один канал управления) ищется как решение функционального уравнения, записанного относительно соответствующей макропеременной ψ . Это уравнение представляет собой дифференциальное уравнение, обладающее свойством асимптотической устойчивости относительно $\psi = 0$. Обычно используется функциональное уравнение первого порядка $T\dot{\psi} + \psi = 0$.

Таким образом, для определения управления необходимо дифференцировать макропеременную по времени в силу дифференциальных уравнений модели управляемого объекта. В структуру инвариантного многообразия всегда входит разность между текущими значениями управляемой переменной и задающего сигнала (желаемого значения управляемой переменной). В случае задачи стабилизации задающий сигнал является постоянной величиной, а его производная равна нулю. При изменении задающего сигнала во времени, характерном для задач слежения, дифференцирование макропеременных приведет к появлению производных входного сигнала в законе управления. Таким образом, на вход следящего регулятора должен поступать не только задающий сигнал, но и его производные по времени. Продемонстрируем это на простом примере.

Рассматривается объект, описываемый математической моделью следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= (u - f(x_2))a_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Подобную структуру имеют модели, описывающие динамику механических систем с одной степенью свободы, где переменные x_1 и x_2 соответствуют перемещению и скорости, управление u имеет смысл внешней силы, а функция $f(x_2)$ характеризует силы, препятствующие движению.

Поставим задачу найти управление как функцию $u = u(\mathbf{x}, g)$, которое обеспечит асимптотическое схождение значения управляемой переменной x_1 к значению входного задающего сигнала, являющегося неизвестной функцией времени $g = g(t)$.

Для решения поставленной задачи введем инвариантное многообразие:

$$\psi = x_2 + k(x_1 - g(t)) = 0. \quad (3)$$

На этом многообразии динамика замкнутой системы будет описываться дифференциальным уравнением первого порядка $\dot{x}_1 = -k(x_1 - g(t))$. Очевидно, что при $k > 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_1 - g(t)) = 0$.

Закон управления ищется как решение функционального уравнения $T\dot{\psi} + \psi = 0$ в силу уравнений модели (2):

$$\begin{aligned}
T(\dot{x}_2 + k\dot{x}_1 - k\dot{g}) + x_2 + k(x_1 - g(t)) &= 0 \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow T((u - f(x_2))a_1 + kx_2 - k\dot{g}) + x_2 + k(x_1 - g(t)) &= 0 \Rightarrow \\
\Rightarrow u = f(x_2) - k(x_2 - \dot{g})/a_1 - (x_2 + k(x_1 - g(t)))/(a_1 T). &
\end{aligned} \tag{4}$$

На рис. 1 представлены полученные в результате компьютерного моделирования замкнутой системы (2), (4) переходные процессы переменной x_1 (синяя линия) и задающего воздействия (красная линия) при $f(x_2) = x_2 + x_2^3$, $a_1 = 1$, $T = 1$, $k = 10$ и задающем воздействии, описываемом функцией $g(t) = \sin(0,4t) + 0,5\sin(0,2t) + 0,25\sin(0,1t)$. Как видно из графиков, синтезированный регулятор обеспечивает асимптотическое схождение $x_1(t)$ к $g(t)$.

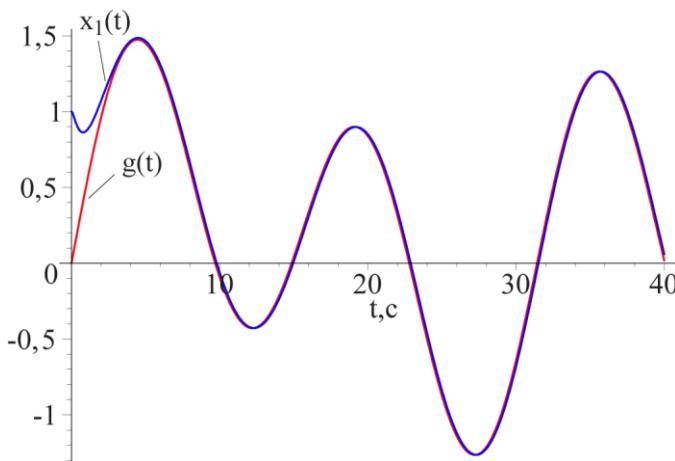


Рисунок 1 – Переходные процессы управляемой переменной и задающего сигнала в следящей системе (2), (4).

Необходимо отметить, что в рассматриваемом примере процедура синергетического синтеза включала в себя только один этап, а инвариантное многообразие задавалось сразу. В случае объектов высокого порядка процедура синтеза включает ряд последовательных этапов динамической декомпозиции, а инвариантное многообразие формируется в ходе этой процедуры. При синтезе следящих регуляторов это приведет к появлению в законе управления высших производных входного сигнала по времени (порядок высшей производной равен числу этапов декомпозиции). Многократное дифференцирование входного сигнала считается нежелательным с точки зрения технической реализации алгоритмов управления. В этой связи, целесообразна разработка методики синергетического синтеза следящих регуляторов, использующих информацию только о входном сигнале и не требующих его дифференцирования.

2. Синтез следящего регулятора с текущей кусочно-линейной аппроксимацией входного сигнала

Любая непрерывная функция с достаточной степенью точностью может быть аппроксимирована полиномиальной функцией. Если степень этого полинома равна единице, имеет место линейная аппроксимация, нашедшая широкое применение на практике.

Задающий сигнал в следящей системе, являющийся неизвестной функцией времени, тоже можно рассматривать как линейный сигнал с переменным коэффициентом наклона аппроксимирующей прямой. Данные рассуждения легли в основу разработки следующей методики синергетического синтеза следящих регуляторов, которая основана на принципе расширения пространства состояний исходной системы дифференциальным уравнением опорного времененного сигнала (линейной функции времени) и использует методику синтеза асимптотического наблюдателя коэффициента наклона аппроксимирующей прямой.

Если некоторая величина $g(t)$ изменяется линейно во времени: $g(t) = g_1 t$, то динамика этого изменения описывается дифференциальным уравнением $\dot{g} = g_1$. Тогда модель расширенной системы (модель синтеза) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}, u), \\ \dot{y}_1 &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= 0,\end{aligned}, \quad (5)$$

где y_1 – переменная модели опорного сигнала, y_2 – переменная, характеризующая текущее значение коэффициента наклона аппроксимирующей прямой. Из последнего уравнения (5) следует, что y_2 – кусочно-постоянная величина, а, следовательно, y_1 является кусочно-линейной функцией времени.

Процедура синтеза включает в себя два этапа. На первом этапе проводится синтез регулятора в предположении, что все переменные модели (5) являются наблюдаемыми. На втором – проводится синтез асимптотического наблюдателя, проводящего оценку текущего значения y_2 . После этого оценка \hat{y}_2 подставляется в синтезированный закон управления.

Покажем применение данной методики на примере. Поставим задачу синтезировать следящий регулятор для объекта, описываемого моделью (2). Модель расширенной системы в этом случае принимает вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= (u - f(x_2))a_1 \\ \dot{y}_1 &= y_2, \\ \dot{y}_2 &= 0.\end{aligned}, \quad (6)$$

Регулятор должен обеспечивать асимптотическое сходжение управляемой переменной к переменной опорного сигнала: $x_1 \rightarrow y_1$. Поэтому вводится инвариантное многообразие

$$\psi = x_2 + k(x_1 - y_1) = 0. \quad (7)$$

Закон управления находится как решение функционального уравнения $T\dot{\psi} + \psi = 0$ в силу уравнений модели (6):

$$\begin{aligned}T(\dot{x}_2 + k(\dot{x}_1 - \dot{y}_1)) + x_2 + k(x_1 - y_1) &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T((u - f(x_2))a_1 + k(x_2 - y_2)) + x_2 + k(x_1 - y_1) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow u &= f(x_2) - k(x_2 - y_2)/a_1 - (x_2 + k(x_1 - y_1))/(a_1 T).\end{aligned} \quad (8)$$

Для синтеза наблюдателя используется методика синергетического синтеза асимптотических наблюдателей [2]. Модель расширенной системы представляется в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{g}_0(\mathbf{v}, u) + \mathbf{G}_1(\mathbf{v})\mathbf{w}; \\ \dot{\mathbf{w}} &= \mathbf{h}_0(\mathbf{v}, u) + \mathbf{H}_1(\mathbf{v})\mathbf{w},\end{aligned} \quad (9)$$

где \mathbf{v} – вектор наблюдаемых переменных, \mathbf{w} – вектор наблюдаемых переменных.

В нашем случае:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = y_2, \quad \mathbf{g}_0 = \begin{bmatrix} x_2 \\ (u - f(x_2))a_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h}_0 = 0, \quad \mathbf{H}_1 = 0. \quad (10)$$

Уравнения наблюдателя находятся из выражения

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{L}\mathbf{z} - \mathbf{L} \int_0^v \Gamma(\mathbf{v}) d\mathbf{v} - \mathbf{h}_0 + \Gamma(v)\mathbf{g}_0, \\ \hat{\mathbf{w}} &= \int_0^v \Gamma(\mathbf{v}) d\mathbf{v} - \mathbf{z}.\end{aligned}\quad (11)$$

где \mathbf{z} – переменные наблюдателя, \mathbf{L} – матрица, выбираемая из условия устойчивости наблюдателя (в нашем случае содержит один элемент l_1 , условие устойчивости $l_1 < 0$), матрица $\Gamma(\mathbf{v})$ вычисляется из уравнения $\mathbf{H}_1 - \mathbf{L} = \Gamma(\mathbf{v})\mathbf{G}_1$.

Подставляя (10) в (11) получим искомые уравнения наблюдателя:

$$\dot{z}_1 = l_1 z_1 + l_1^2 y_1 \quad (12)$$

и оценки коэффициента наклона аппроксимирующей прямой

$$\hat{y}_2 = -l_1 y_1 - z_1 \quad (13)$$

Следует отметить, что уравнения (12), (13) справедливы для любых объектов, описываемых моделью (1).

С учетом оценки (13) закон управления принимает окончательный вид:

$$u = f(x_2) - k(x_2 + l_1 y_1 + z_1)/a_1 - (x_2 + k(x_1 - y_1))/(a_1 T). \quad (14)$$

Для анализа эффективности синтезированного следящего регулятора было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы (6), (12)-(14) при таких же параметрах объекта и регулятора и различных входных воздействиях. На вход следящей системы в реальных условиях работы поступает не опорный кусочно-линейный сигнал y_1 , а задающий сигнал $g(t)$, изменяющийся во времени произвольным образом. Поэтому для корректного моделирования системы нужно произвести замену $y_1 = g(t)$ в уравнениях (12) – (14).

На рис. 2 представлены графики входящего воздействия $g(t) = 2 + t$ и переходного процесса управляемой переменной x_1 .

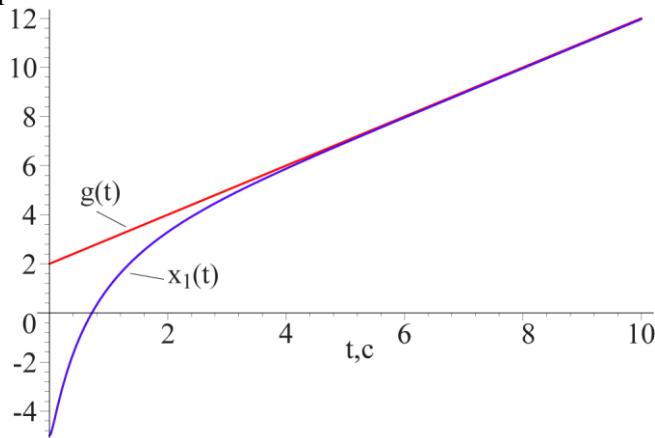


Рисунок 2 – Переходные процессы управляемой переменной и задающего сигнала в следящей системе (6), (12)-(14) при $g(t) = 2 + t$.

На рис. 3 показано изменение во времени оценки коэффициента наклона аппроксимирующей прямой. Видно, что оценка стремится к значению 1, которое соответствует коэффициенту перед t в функции $g(t)$.

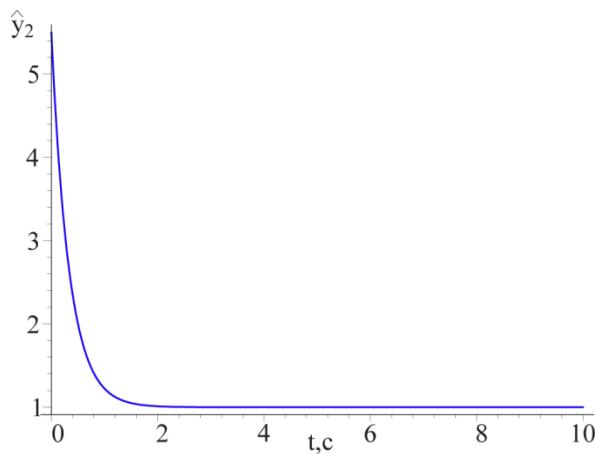


Рисунок 3 – Оценка коэффициента наклона аппроксимирующей прямой при $g(t) = 2 + t$.

На рис. 4 представлены результаты моделирования следящей системы (6), (12)-(14) при входном сигнале $g(t) = 1 + 0,5t - 0,1t^2$. Из рис. 5, показывающего изменение оценки коэффициента наклона аппроксимирующей прямой во времени, видно, что этот коэффициент меняется линейно, что соответствует кусочно-линейной аппроксимации параболической функции.

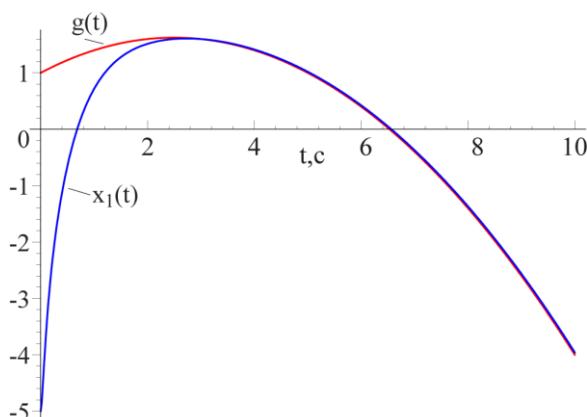


Рисунок 4 – Переходные процессы управляемой переменной и задающего сигнала в следящей системе (6), (12)-(14) при $g(t) = 1 + 0,5t - 0,1t^2$.

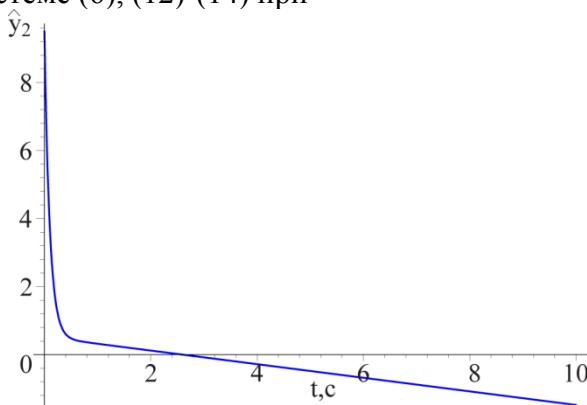


Рисунок 5 – Оценка коэффициента наклона аппроксимирующей прямой при $g(t) = 1 + 0,5t - 0,1t^2$.

На рис. 6-7 представлены результаты моделирования следящей системы при входном сигнале $g(t) = 5 \sin(0,5t)$, демонстрирующие эффективность предложенного алгоритма для воспроизведения гармонических функций времени.

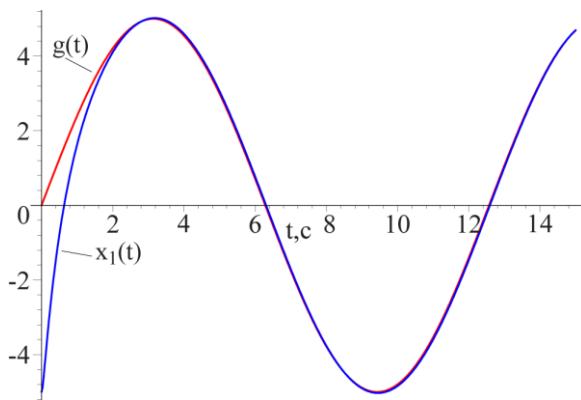


Рисунок 6 – Переходные процессы управляемой переменной и задающего сигнала в следящей системе (6), (12)-(14) при $g(t) = 5\sin(0,5t)$.

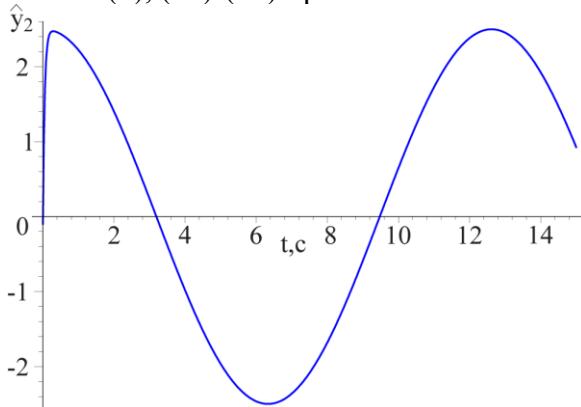


Рисунок 7 – Оценка коэффициента наклона аппроксимирующей прямой при $g(t) = 5\sin(0,5t)$.

Оценивая результаты компьютерного моделирования, можно сделать вывод, что предложенный подход позволяет синтезировать регуляторы, способные отрабатывать задающие воздействия общего класса непрерывных функций времени, и может послужить теоретической основой для проектирования следящих систем управления нелинейными динамическими объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994,
2. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления/Под редакцией А.А. Колесникова. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.Ч.2.
3. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал.А., Топчиев Б.В., Мушленко А.С., Кобзев В.А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – Изд. 2. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013.
4. 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. 2. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013.
5. Попов А.Н. Синергетический синтез регуляторов для задач генерации колебательных режимов в технических системах // Известия ЮФУ. Технические науки, 2012. – №4(129). – С. 156-162.

КРИТЕРИЙ СЛАБОЙ АТТРАКТИВНОСТИ НЕУСТОЙЧИВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ

Аннотация. В работе рассматриваются нелинейные системы с негиперболическим положением равновесия. Требуется определить, является ли это положение слабым аттрактором, а именно принадлежит ли оно границе области притяжения. На основе выдвинутой в работе [3] гипотезы предложен численный алгоритм проверки указанного свойства, который сводит исходную задачу поиска области с некоторыми свойствами к задаче полиномиальной оптимизации.

Ключевые слова: слабо аттрактивные множества, функции Ляпунова, аттрактивность.

Annotation. We consider nonlinear dynamic systems with non-hyperbolic equilibria. The goal of this paper is to find an algorithm for detecting if the equilibria is a weak attractor on boundary of attractivity set. The proposed algorithm is based on hypothesis from [3] and transform original problem to polynomial optimization problem.

Keywords: weakly attracting set, Lyapunov functions, attractivity.

1. Введение

Устойчивость по Ляпунову, как правило, является одним из обязательных требований к проектируемым системам управления. Существуют, однако, системы, имеющие неустойчивые по Ляпунову, но в то же время аттрактивные инвариантные множества. Например, при возникновении бифуркации седло-узел образовавшееся положение равновесия неустойчиво, однако существует множество ненулевой меры, из которого решения стремятся к указанной особой точке. Если из физического смысла задачи начальные условия принадлежат этой области, то положение равновесия можно считать устойчивым в практическом смысле.

Таким образом, определённый интерес представляют критерии аттрактивности неустойчивых положений равновесия. В работе [1] представлен алгебраический критерий ляпуновского типа для класса систем, который включает в себя соединение устойчивой подсистемы с одномерной неустойчивой подсистемой. В работе [2] представлен критерий для систем, в которых линеаризованная система в окрестности некоторого положения равновесия имеет нулевой корень. В работе [3] выдвигается гипотеза, обобщающая этот результат. Она носит вид существования некоторой области с заданными свойствами, которое в общем случае непонятно как проверить. В данной работе приводится численный алгоритм, проверяющий, существует ли конус с заданными свойствами.

2. Основные теоретические положения

Рассматривается система

$$\dot{z} = p(z) \quad (1)$$

где векторное поле $p : \mathbb{C}^m \rightarrow \mathbb{C}^m$ – непрерывное, локально Липшицово по z ,

$$J = \frac{\partial p}{\partial z}(0)$$

дифференцируемое в нуле и $p(0) = 0$. Обозначим якобиан в нуле J , его собственные числа как $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$, причём $\sigma_1 = 0$, а вещественные части остальных собственных чисел отрицательны.

С учетом приведенных условий всегда можно найти невырожденную матрицу T (используя, например, алгоритм приведения к жордановой форме), такую что

$$TJT^{-1} = \begin{pmatrix} A & b \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad A \in \mathbb{R}^{n \times n}, \quad b \in \mathbb{R}^n,$$

где собственные числа матрицы A имеют отрицательную вещественную часть.

Введём в рассмотрение новый вектор состояния $v = (x \ \lambda)^T = Tz$, где $x \in \mathbb{R}^n$, $\lambda \in \mathbb{R}$, $n = m - 1$. Тогда в новых координатах динамика системы (1) описывается как $\dot{v} = Tp(T^{-1}v)$, или, раскрывая вектор v , как

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, \lambda) \\ \dot{\lambda} &= g(x, \lambda) \end{aligned} \tag{2}$$

Справедлива следующая теорема [2]:

Теорема 1. Рассматривается система (2), где функция $g(x, \lambda)$ дважды дифференцируема по обоим аргументам. Пусть G – гессиан функции g в нуле, и матрица G – знакоопределенная. Тогда нулевое положение равновесия – слабый аттрактор системы (2).

Отметим, что в некоторых случаях (см. примеры из следующей секции) требование знакоопределенности Гессиана не всегда соблюдается. Тем не менее, в работе [3] выдвинута гипотеза, обобщающая теорему и на случай незнakoопределенных Гессианов G .

Гипотеза 1. Рассматривается система (2), где функция $g(x, \lambda)$ дважды дифференцируема по обоим аргументам. Пусть G – гессиан функции g в нуле. Тогда, если матрица G является знакоопределенной в некоторой положительно инвариантной области, содержащей положение равновесия, то нулевое положение равновесия – слабый аттрактор системы (2).

3. Основной результат

Пусть задана система (2), в сокращённом виде $\dot{v} = p(v)$. Проверка условий гипотезы 1 требует поиска некоторой положительно инвариантной области, содержащей положение равновесия, в которой гессиан Q является знакоопределенным, что затрудняет использование гипотезы. Покажем, как можно применять гипотезу для полиномиальных систем. Для этого будем искать инвариантную область в виде конуса $K = \{(x, \lambda) | \lambda \geq k\|x\|, \lambda \leq h\}$. Фактически требуется найти параметры $k \in \mathbb{R}_+$ и $h \in \mathbb{R}_+$, такие что:

1. Для всех $v \in K$ гессиан знакоопределен: $v^T Q v > 0$ или $v^T Q v < 0$.

2. Для всех $v \in \partial K$ векторное поле $p(v)$ направлено внутрь конуса K .

Рассмотрим каждое условие подробнее.

3.1. Знакоопределенность гессиана

Заметим, что верхнюю границу $\lambda = h$ рассматривать необязательно, так как множество знакоопределенности образует конус (если для некоторого v выполняется $v^T Q v > 0$, то $(kv)^T Q (kv) = k^2 v^T Q v > 0$ для $k \in \mathbb{R}_+$).

Чтобы не рассматривать два случая, можно посмотреть на знак $v_0^T Q v_0$ в точке $v_0 = (x = 0, \lambda = \varepsilon)$ для некоторого $\varepsilon \in \mathbb{R}_+$. Далее везде будем полагать, что $v^T Q v > 0$.

Возведя в квадрат обе части неравенства $\lambda \geq k \|x\|$, мы добавим симметричное ограничение, но так как мы работаем с конусами, то включение не изменится:

$$\{(x, \lambda) | \lambda^2 \geq k^2 x^T x\} \subseteq \{(x, \lambda) | v^T Q v > 0\}$$

Перепишем:

$$\{v | v^T Q_0 v \geq 0\} \subseteq \{v | v^T Q v > 0\},$$

где

$$Q_0 = \begin{pmatrix} -k^2 I_{n \times n} & 0_{n \times 1} \\ 0_{1 \times n} & 1 \end{pmatrix}$$

Согласно S-процедуре, включение выполняется, если существует такое $\tau \geq 0$, что $Q > \tau Q_0$. Последовательно увеличивая k , пытаемся найти такое его значение, при котором можно найти τ , т.е. выпуклая задача оптимизации разрешима.

В некоторых случаях можно найти решение проще. Например, при $n=1$ (системы второго порядка), уравнение $v^T Q v = 0$ для знаконеопределённых матриц Q имеет два решения: $\lambda = k_1 x$ и $\lambda = k_2 x$, которые легко могут быть найдены. Таким образом, $k \geq \max(|k_1|, |k_2|)$.

3.2. Направление векторного поля

Рассмотрим сначала боковую грань. Возведя в квадрат, получим $\lambda^2 = k^2 x^T x$, $\lambda \geq 0$, следовательно нормаль имеет вид $(-2k^2 x^T, 2\lambda)^T$. Для того, чтобы векторное поле было направлено внутрь, необходимо и достаточно, чтобы скалярное произведение векторного поля на нормаль было неотрицательным, т.е. $-2k^2 x^T f + 2\lambda g \geq 0$ для всех x, λ таких, что $\lambda^2 = k^2 x^T x$, $\lambda \geq 0$, $\lambda \leq h$.

Аналогично для «крышки» конуса: $g(x, \lambda = h) \leq 0$ для всех $\|x\| \leq \frac{h}{k}$.

Если функции f и g являются полиномами, то используя P-satz, получим условие инвариантности конуса:

если существуют неотрицательные полиномы $s_1(x, \lambda), \dots, s_4(x, \lambda), s_5(x)$, такие что для всех $x \in \mathbb{R}^n$, $\lambda \in \mathbb{R}$ выполняется

$$\begin{aligned} -2k^2 x^T f + 2\lambda g - s_1(\lambda^2 - k^2 x^T x) - s_2(k^2 x^T x - \lambda^2) - s_3 \lambda - s_4(h - \lambda) &\geq 0 \\ -g(x, h) - s_5\left(\frac{h^2}{k^2} - x^T x\right) &\geq 0 \end{aligned}$$

то векторное поле направлено внутрь конуса K .

Далее, заменяя требование неотрицательности на разложимость на сумму квадратов и фиксируя степень полиномов s_i , получим задачу SOS-оптимизации.

Заметим, что для случая $n=1$ полученные условия также можно упростить, выразив x через λ .

3.3 Итоговый алгоритм

Объединяя два указанных выше условия, получим, что для заданных значений k и h проверка локального критерия сводится к следующей задаче оптимизации:

Найти скаляр τ и полиномы $s_1(x, \lambda), \dots, s_4(x, \lambda), s_5(x)$, такие что

$$-2k^2x^T f + 2\lambda g - s_1(\lambda^2 - k^2 x^T x) - s_2(k^2 x^T x - \lambda^2) - s_3\lambda - s_4(h - \lambda) \geq 0$$

$$-g(x, h) - s_5\left(\frac{h^2}{k^2} - x^T x\right) \geq 0$$

$$Q > \tau Q_0$$

$$s_i \in \Sigma$$

$$\tau > 0$$

Т.е. мы имеем оракул, который отвечает на вопрос, для заданных k и h будет ли образованный конус инвариантным. Далее ищем k и h каким-нибудь известным методом оптимизации.

4. Пример

Рассмотрим динамику взаимодействия видов хищник-жертва, основанную на решётчатой модели [4], в предположении, что хищник Y может воспроизводиться и в отсутствии жертвы Y :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= r_1 x(1 - m_1 - x - (1 + \beta)y) \\ \dot{y} &= r_2 y(-m_2 + (1 + \alpha)x(1 - x - y)) \end{aligned} \quad (3)$$

где x и y – отношение занятых территорий. Более подробно с моделью и физическим смыслом неотрицательных параметров $r_1, r_2, m_1, m_2, \alpha$ и β можно ознакомиться в [4].

Положим $r_1 = r_2 = 1, m_1 = 0,1, m_2 = 1,2$. При этих параметрах всегда существуют три положения равновесия: $z_1 = (0; -0,2)$, $z_2 = (0; 0)$ и $z_3 = (0,9; 0)$. В случае $\alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_1$ и $\beta = \beta^*$, где $\alpha_0 = 2m_2 - 1 + 2\sqrt{m_2(m_2 - 1)}$, $\alpha_1 = \frac{m_2 - m_1}{m_1(1 - m_1)}$, $\beta^* = \frac{-B + \sqrt{D}}{2A}$, $A = (1 + \alpha)^2 - 4\alpha m_2$, $B = 2\alpha(m_1 + \alpha m_1 - 2m_2)$, $C = \alpha^2 m_1^2$, $D = B^2 - 4AC$, возникает бифуркация седло-узел и четвёртое положение равновесия z_4 . Выберем $\alpha = 7$, and $\beta = \beta^*$. Тогда особая точка $z_4 = (0,49; 0,23)$ имеет положительно инвариантное притягивающее множество, граница которого изображена жирной линией на рисунке 1.

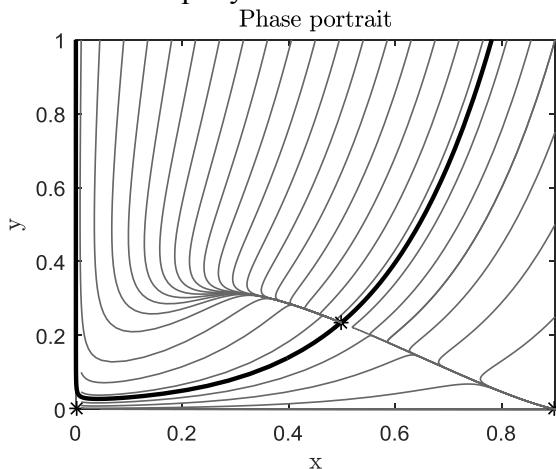


Рисунок 1 – фазовый портрет при $\alpha = 7$

Проверим, выполняется ли локальный критерий. Для этого сначала подлежащим преобразованием координат сдвигом рассматриваемую точку z_4 в ноль. Собственные числа Якобиана полученной системы в нуле равны $\lambda_1 = -1.55$, $\lambda_2 = 0$.

Запишем матрицу перехода:

$$T = \begin{pmatrix} 0,396 & 0,678 \\ -0,396 & 0,322 \end{pmatrix}$$

Тогда в новых координатах гессиан в нуле равен

$$G = \begin{pmatrix} -4,187 & -1,899 \\ -1,899 & -1,291 \end{pmatrix}$$

и является отрицательно определённым, то есть локальный критерий выполняется.

Положим в той же системе (3) $\alpha = 10$ и $\beta = \beta^*$. В этом случае положение равновесия $z_4 = (0,61; 0,22)$. Собственные числа якобиана в этой точке равны $\lambda_1 = -2,18$ и $\lambda_2 = 0$. Матрица перехода:

$$T = \begin{pmatrix} 0,549 & 0,72 \\ -0,549 & 0,28 \end{pmatrix}$$

Гессиан в нуле в новых координатах равен

$$G = \begin{pmatrix} -5,46 & -2,75 \\ -2,75 & -0,51 \end{pmatrix}$$

и не является знакоопределенным. Однако для заданной системы существует инвариантное притягивающее множество, граница которого изображена на рисунке 2 красной линией. Синим изображены линии, на которых квадратичная форма $v^T G v = 0$. Полученный описанным выше алгоритмом конус в исходных координатах изображён красным цветом. Заметим, однако, что он является слабой оценкой области притяжения. Для этого рассмотрим, например, треугольник, образованный прямыми $y = -x$, $y = 0,3x$ и $y = 16,55x + 8,775$, показанный на рисунке фиолетовым. Видно, что внутри треугольника $v^T G v$ имеет один знак. Нетрудно проверить, что выполняются неравенства $(-1 \ -1)^T p(x, y) \geq 0$ для всех $x \in [-0,5; 0]$, $(-0,3 \ 1)^T p(x, y) \geq 0$ для всех $x \in [-0,54; 0]$ и $(16,55 \ -1)^T p(x, y) \geq 0$ для всех $x \in [-0,54; 0,5]$. Таким образом, векторное поле на границе треугольника направлено внутрь и полученная оценка области притяжения значительно превышает по объёму область, построенную при помощи алгоритма.

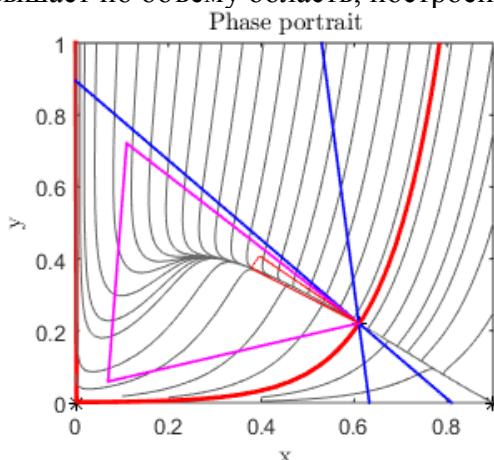


Рисунок 2 – фазовый портрет при $\alpha = 10$

5. Заключение

В работе представлен алгоритм, позволяющий строить положительно инвариантные конусы, в которых гессиан системы в особой точке является знакоопределенным. Это позволяет проверять, является ли положение равновесия слабым атTRACTором. Для этого требуется решать задачу полиномиальной оптимизации. Приведён пример работы предложенного алгоритма

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Gorban, I. Tyukin, E. Steur, H. Nijmeijer. Lyapunov-like conditions of forward invariance and boundedness for a class of unstable systems // SIAM Journal on Control and Optimization, Vol. 51, № 3, P. 2306–2334, 2013.
2. A. Gorban, I. Tyukin, H. Nijmeijer. Further Results on Lyapunov-Like Conditions of Forward Invariance and Boundedness for a Class of Unstable Systems // Proceedings of 53rd IEEE Conference on Decision and Control, 2014, P. 1557-1562.
3. А.Н. Горбань, И.Ю. Тюкин, С.А. Романов. Критерии атTRACTивности неустойчивых положений равновесия нелинейных систем по первому и второму приближениям // Наука и образование: технология успеха: сб. докл. Международной научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», С. 59-62, 2016.
4. Y. Wang, H.Wu. Population dynamics of intraguild predation in a lattice gas system // Mathematical Biosciences, Vol. 259, P. 1-11, 2015.

Скляров Андрей Анатольевич, Похилина Татьяна Евгеньевна

Южный федеральный университет

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА КОЛЕСАХ ИЛОНА¹

Аннотация. В работе демонстрируется новый подход к нелинейному управлению мобильной робототехнической платформой на колесах Илона. В качестве объекта управления выбран мобильный робот на колесах Илона, так как среди прочих наземных транспортных средств он является наиболее манёвренным и предназначенным для работы в условиях ограниченного пространства, рассчитан на выполнение задач в складских помещениях. Платформа имеет форму треугольника, так как колеса расположены под углом 120 градусов, оси которых проходят через центр транспортного средства, что позволяет данной конструкции перемещать грузы в ограниченном пространстве. Для учета нелинейных характеристик объекта управления в статье рассмотрены вопросы анализа математической модели мобильной робототехнической платформой на колесах Илона. Также, приводится обзор современных методов и подходов к управлению робототехнической платформой на колесах Илона. Выделяются проблемы управления Платформой, в частности, применение методов и подходов основанных на применении методов линеаризации системы, что делает робототехническую систему с данными законами управления ограниченной определенными локальными алгоритмами управления. Поэтому в работе приводиться обоснование использования новых нелинейных подходов к управлению мобильными роботами, в частности синергетической теории управления. Основным методом, в рамках данной теории, является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (ACAR), который позволяет синтезировать законы управления для сложных нелинейных систем большой размерности без применения процедур линеаризации или других упрощений, поэтому для синтеза синергетического закона управления мобильного робота применяется именно этот метод. Полученный закон пространственного управления учитывает нелинейные свойства модели мобильной робототехнической платформы на колесах Илона, поэтому указанная стратегия управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы, и четкое исполнение заданных инвариантов. Для апробации полученной системы используется компьютерное моделирование. Результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления мобильным роботом на колесах Илона обеспечивается передвижение к заданной точке рабочей плоскости с заданным углом ориентации платформы.

Ключевые слова: Мобильный робот; колеса Илона; синергетическая теория управления; всенаправленное движение.

Annotation. This paper presents a new approach to the nonlinear control system design for robotic omni-wheel drive platform. The omni-wheel drive platform is chosen as controlled object because among the others this type of unmanned vehicle is the most maneuverable, designed to work in closed spaces such as warehouses, hangars and etc. The platform has the shape of a triangle. The wheels of platform are located at an angle of 120 degrees, whose axes pass through the center of the vehicle. The design allows to move loads in a closed space. In the paper is given an overview of modern methods and approaches to the control of the omni-wheels robotic platform. The problems of platform control are highlighted, in particular shows that the application of methods and approaches based on linearization methods of the nonlinear system makes the robotic system limited to certain local control algorithms. Therefore, in the paper provides an explanation of using new non-linear approaches to the management of mobile robots, in particular, the synergetic control theory. The main method of the synergetic control theory is the method of analytical construction of aggregated regulators (ACAR), which allows synthesizing control laws for

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант №16-08-00875A).

complex nonlinear systems of large dimension without the use of linearization procedures or other simplifications; therefore, this method is used to synthesize the synergetic control law of a mobile robot. The resulting control law takes into account the non-linear properties of the model of the mobile omni-wheels robotic platform, so this control strategy ensures the asymptotic stability of the close-loop system. The verification of the obtained system was made by computer simulation. The simulation results confirm that in the synthesized close-loop system, movement of the mobile robot to a given point of the working plane with a given orientation angle of the platform is provided.

Keywords: Mobile robot; Omni-wheel drive; Synergetic control theory; Omni-directional movement.

Введение

Возможность двигаться в любом направлении является несомненным преимуществом для любого наземного транспортного средства, в особенности если решается задача маневрирования в пределах ограниченных складских помещений. К таким транспортным средствам можно отнести вилочные погрузчики, платформы для поддержки и обслуживания авиационной техники, моторизованные тележки и грузовики. Возможность передвигаться в любом направлении на плоскости без изменения ориентации корпуса транспортного средства позволила приобрести широкую популярность мобильным роботам на колесах Илона [1 – 6]. Так одной из самых известных компаний, разрабатывающих и внедряющих робототехнические платформы на колесах Илона, является фирма KUKA [6]. Конструкция и особенности движения подобных роботов дают ряд преимуществ [2]. За счет особенного строения колес Илона, мобильный робот имеет возможность в любой момент времени изменить направление движения на новый заданный угол без осуществления дополнительного разворота для выхода на новую траекторию [2]. Также поступательное движение можно сочетать с вращательным, так что робот будет подъезжать к месту назначения под заданным углом [3].

Основная идея движения мобильного транспортного робота на колесах Илона заключается в следующем: поступательное движение робота оптимально совершать тем колесом, ось вращения которого образует наибольший угол с заданным направлением движения, а колесо, которое образует наименьший угол, будет целесообразно остановить, т.к. его влияние на движение робота не значительно. Чтобы достичь минимального сопротивления на периферии колеса устанавливаются ролики, направление вращения которых перпендикулярно направлению движения колеса. На рисунках 1 и 2 представлены примеры колеса Илона и всенаправленной трехколесной платформы, соответственно.



Рисунок 1 – Пример колеса Илона



Рисунок 2 – Трехколесный всенаправленный робот

В настоящее время большое количество работ посвящено исследованию динамики колесных роботов [7 – 14]. В частности, рассматриваются преимущества различных видов конструкций, количества и типов колес, а также их кинематических моделей [9]. В частности, задачи оптимального планирования траектории предложены в работах [10] и [11]. В [12] на основе линейной модели построены пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы

(ПИД-регуляторы) для управления движением центра масс и ориентацией платформы робота. В [13] построены ПИ и ПД регуляторы для управления скоростью платформы и углом ее поворота. В [14] построены нелинейные динамические модели робота и разработаны интегральные управления на основе метода линеаризации системы вдоль заданной траектории.

Однако в большинстве рассмотренных работ, в частности основанных на применении методов линеаризации системы [12 – 14], учетом нелинейных свойств системы пренебрегают, что делает робототехническую систему с данными законами управления ограниченной определенным конечным множеством рабочих ситуаций. Данный факт объясняется сложностью математических моделей мобильных роботов на колесах Илона – большим количеством нелинейных составляющих и высоким порядком уравнений, описывающих динамику их движения в пространстве. Поэтому, в настоящее время, существует необходимость создания системы управления мобильным роботом на колесах Илона, которая бы учитывала нелинейные свойства объекта управления для повышения устойчивости системы в рамках доступных режимов функционирования.

Цель управления. В настоящее время, для решения задач синтеза законов нелинейного управления объектами высокой размерности, применяется синергетическая теория управления (СТУ) [15], разработанная профессором А. А. Колесниковым. Основным методом, в рамках данной теории, является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который позволяет синтезировать законы управления для сложных нелинейных систем большой размерности без применения процедур линеаризации или других упрощений. Основная идея СТУ заключается в том, что управление системой должно быть организовано таким образом, чтобы в пространстве состояний системы образовывались предельные множества – аттракторы, отвечающие целям функционирования, т.е. обеспечивали необходимое поведение системы [15]. Синергетический подход базируется на таких понятиях как принцип инвариантности и принцип расширения – сжатия фазового объема в диссипативных динамических системах, к которым, в частности, относятся мильные роботы. Поэтому для синтеза нелинейного закона управления мобильной робототехнической платформой на колесах Илона в статье предлагается использовать принципы и методы синергетической теории управления, в частности метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов.

Математическая модель всенаправленной платформы. В качестве объекта управления в статье рассматривается трехколесный робот на колесах Илона (см. рисунок 3), который имеет треугольную форму, при этом колеса расположены под углом 120 градусов, оси которых проходят через центр платформы.

Описание динамики и кинематики мобильного робота можно найти в работах [16 – 24]. Для создания заданного движения мобильным роботом на колесах Илона необходимо управлять скоростью вращения каждого исполнительного привода. Для оптимизации работы приводов мобильного робота необходимо принять во внимание следующие особенности:

- для заданного движения мобильного робота на колесах Илона необходимо выдерживать определенное соотношение угловых скоростей приводов, при этом для увеличения общей скорости необходимо прямо пропорционально увеличивать угловые скорости приводов.

- для колеса Илона, вращающегося с определенной скоростью, необходимо добавлять или вычитать поровну скорости каждого привода.

- исполнительные приводы мобильного робота ограничены физическим свойствами обмоток ротора, поэтому при формировании управляющего воздействия необходимо убедиться, что они не работают на пределе своей мощности.

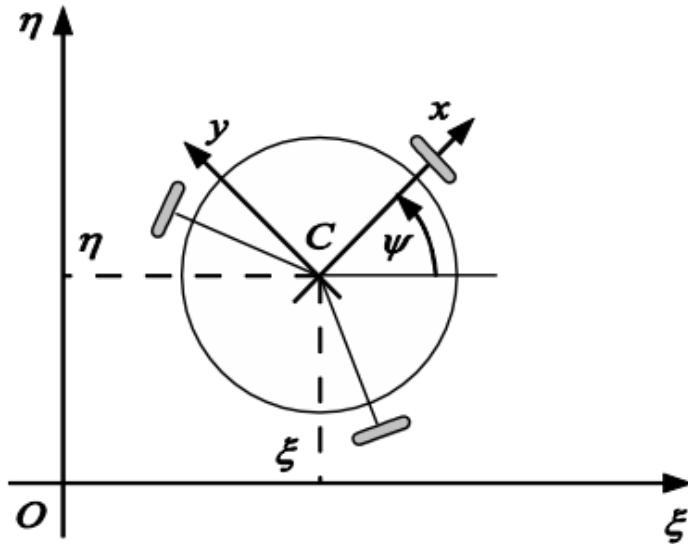


Рисунок 3 – Схема движения мобильного робота на колесах Илона

Для решения задачи синтеза закона управления в статье используется метод АКАР [15, 25]. В данном методе цели задачи управления выступают в виде инвариантных многообразий, а учет нелинейной динамики системы достигается путем применения асимптотического перехода от одного инвариантного многообразия к другому с последовательным понижением размерности многообразий. При таком подходе к задаче управления нет необходимости строгого соответствия параметров реального объекта параметрам заложенной в регулятор модели, нужно лишь обеспечить попадание замкнутой системы в область притяжения инвариантных многообразий, на которых, в свою очередь, поддерживается желаемое конечное состояние объекта управления.

В данной работе инвариантные многообразия выбираются таким образом, чтобы достичь желаемого режима движения мобильного робота на колесах Илона. Поэтому основная задача синтеза состоит в том, чтобы подобрать такие законы управления, которые обеспечивают переход системы из начального состояния в окрестность инвариантного многообразия $\psi(x) = 0$, а затем их дальнейшее устойчивое движение вдоль инвариантных многообразий вплоть до попадания на атTRACTоры.

Для решения задачи методом АКАР запишем математическую модель мобильного робота на колесах Илона в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \frac{\sin x_6 u_1 + \sin(x_6 + k_1) u_2 + \sin(x_6 + k_2) u_3 - h x_1 - m_d x_3 x_2}{m}, \\ \dot{x}_2(t) = \frac{-\cos x_6 u_1 - \cos(x_6 + k_1) u_2 - \cos(x_6 + k_2) u_3 - h x_2 + m_d x_3 x_1}{m}, \\ \dot{x}_3(t) = \frac{-a(u_1 + u_2 + u_3) - 2a^2 h x_3}{I}, \\ \dot{x}_4(t) = x_1, \\ \dot{x}_5(t) = x_2, \\ \dot{x}_6(t) = x_3. \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 – линейная скорость мобильного робота по координате ξ ; x_2 – линейная скорость мобильного робота по координате η ; x_3 – угловая скорость мобильного робота; x_4 – координата ξ рабочей плоскости робота; x_5 – координата η рабочей плоскости робота; x_6 – угол ψ ориентации мобильного робота, m – масса робота, I – момент инерции робота,

m_d – составляющая массо-инерционных параметров системы, a – расстояние от центра платформы до центра каждого колеса, k_1 и k_2 – конструктивные коэффициенты мобильного робота
 $\left(k_1 = \frac{2\pi}{3}, k_2 = \frac{4\pi}{3} \right)$.

Задача синтеза регулятора. Требуется найти такой вектор управляющих воздействий, который бы позволил осуществить движение мобильного робота на колесах Илона в заданные координаты рабочей плоскости $x_4 = x_4^*$, $x_5 = x_5^*$ с заданным углом ориентации $x_6 = x_6^*$.

Поскольку модель объекта содержит три канала управления, то в соответствии с СТУ необходимо использовать синтез векторных регуляторов на основе параллельно-последовательной совокупности инвариантных многообразий [15, 25]. Для решения данной задачи необходимо ввести следующие макропараметры:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_1 - \varphi_1, \\ \psi_2 &= x_2 - \varphi_2, \\ \psi_3 &= x_3 - \varphi_3. \end{aligned} \quad (2)$$

где φ_1 , φ_2 , φ_3 – внутренние управление. Таким образом первая совокупность инвариантных многообразий будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_1 - \varphi_1 = 0, \\ \psi_2 &= x_2 - \varphi_2 = 0, \\ \psi_3 &= x_3 - \varphi_3 = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

На пересечении инвариантных многообразий (3) можно наблюдать эффект динамического «сжатия» фазового пространства или декомпозиция системы. При условии выполнения инвариантного соотношения (3) декомпозированная модель исходной системы (1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= \varphi_1, \\ \dot{x}_5 &= \varphi_2, \\ \dot{x}_6 &= \varphi_6. \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно методу АКАР для системы уравнений (4) введем следующие макропараметры:

$$\begin{aligned} \psi_4 &= x_4 - x_4^*, \\ \psi_5 &= x_5 - x_5^*, \\ \psi_6 &= x_6 - x_6^*, \end{aligned} \quad (5)$$

где x_4^* – желаемое положение по координате ξ , x_5^* – желаемое положение по координате η , x_6^* – желаемый угол поворота робота вокруг своей оси.

Макропараметры (5) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений:

$$\begin{aligned} T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 &= 0, \\ T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 &= 0, \\ T_3 \dot{\psi}_3(t) + \psi_3 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

где T_1 , T_2 , T_3 – некоторые положительные константы, влияющие на скорость переходных процессов системы.

Макропеременные (4) должны удовлетворять решению системы функциональных уравнений:

$$\begin{aligned} T_4 \dot{\psi}_4(t) + \psi_4 &= 0, \\ T_5 \dot{\psi}_5(t) + \psi_5 &= 0, \\ T_6 \dot{\psi}_6(t) + \psi_6 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

где T_4, T_5, T_6 – некоторые положительные константы.

После нахождения внутреннего управления системы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, можно найти внешние управление системы.

Компьютерное моделирование. Проведем компьютерное исследование синтезированной замкнутой системы управления мобильной робототехнической платформой на колесах Илона. Параметры платформы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры синтезированного регулятора

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Масса мобильной платформы	m	кг	20
Составляющая массо-инерционных параметров системы	m_d	кг	3
Расстояние от центра платформы до центра каждого колеса	a	м	0,2
Постоянная, определяющаяся коэффициентом момента противоэлектродвижущей силы	h	Н·с/м	1,6

Моделирование проводится с помощью математического пакета MATLAB. Зададим целевые координаты мобильной робототехнической платформы на колесах Илона следующим образом: $x_4 = 1$ м, $x_5 = 2$ м, и угол ориентации $x_6 = 0$ рад. В качестве начальных условий системы выбираются $x_1 = 0,1$ м/с; $x_2 = 0,1$ м/с; $x_3 = 0,1$ рад/с; $x_4 = 0,1$ м; $x_5 = 0,1$ м; $x_6 = 0,1$ рад.

Результаты моделирования представлены на рисунках 4 – 7.

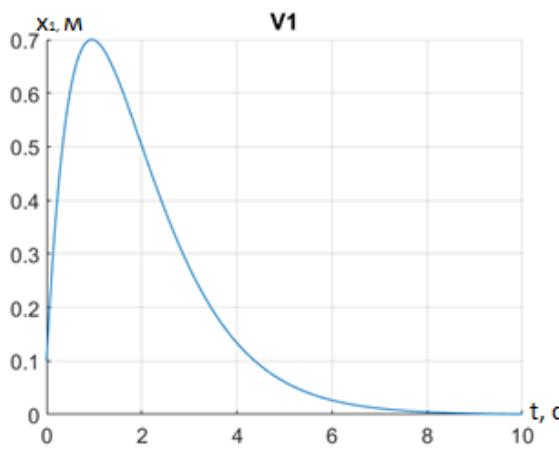


Рисунок 4 – Изменение линейной скорости по оси ξ

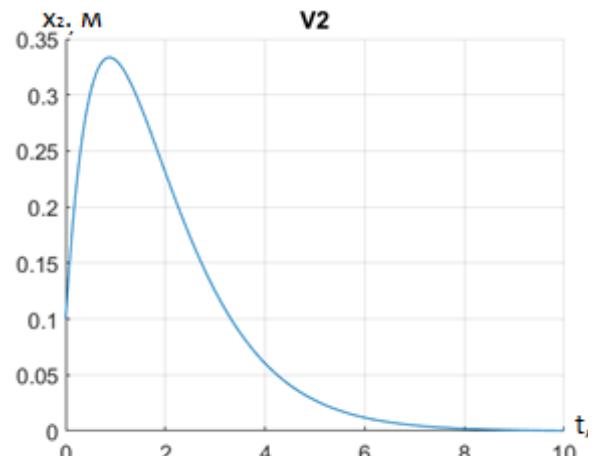


Рисунок 5 – Изменение линейной скорости по оси η

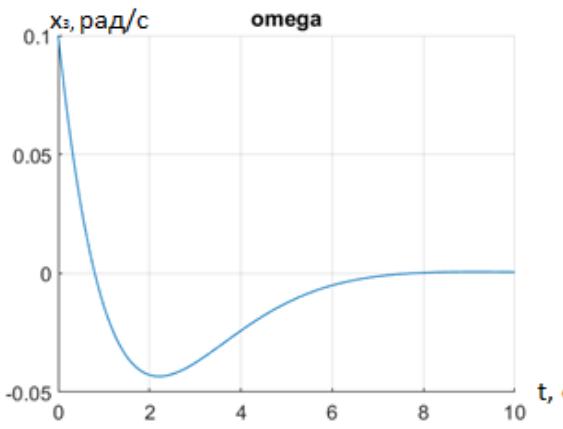


Рисунок 6 – Изменение угловой скорости

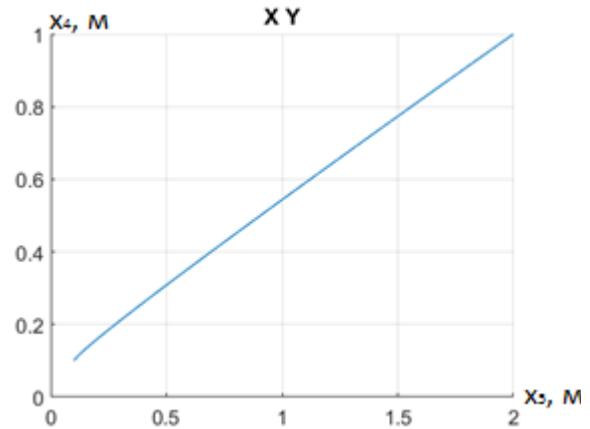


Рисунок 7 – Траектория движения мобильного робота

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления мобильным роботом на колесах Илона (1) – (7) обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов (2) и (5), а именно, передвижение к заданной точке рабочей плоскости (рис. 8) с заданным углом ориентации платформы.

Заключение. Таким образом, в статье представлен важный научный результат – разработана процедура аналитического синтеза стратегии векторного управления мобильным роботом на колесах Илона с использованием полной нелинейной модели движения. Указанная стратегия управления обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы, и четкое исполнение заданных инвариантов. Также, следует отметить, что представленный метод синтеза нелинейных законов управления хорошо коррелирует с «законом необходимого разнообразия» Уильяма Росса Эшби, который гласит, что «...разнообразие (энтропию) системы можно понизить не более чем на величину количества информации в управляющей системе об управляемой, которое равно разнообразию (энтропии) управления за вычетом потери информации от неоднозначного управления...». Другими словами, данный закон перефразировал Роджер Конант «...каждый хороший регулятор системы должен быть моделью этой системы...», что полностью соответствует принципу применения метода АКАР и общей синергетической теории управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алисейчик, А.П. Механика и управление движением: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 01.02.01 / А.П. Алисейчик; Инст. прикл. мат. им. М.В. Келдыша Рос. акад. наук. – М., 2013. – 18 с.
2. Павловский, В.Е. Исследование динамики и синтез управления колесными аппаратами с избыточной подвижностью / В.Е. Павловский, Д.В. Шишканов // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. – 2006. – №12. – 28 с.
3. Diegel, O. Improved Mecanum Wheel Design for Omni-directional Robots / O. Diegel, A. Badve, G. Bright // Proc. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation (ARAA-2002). – Auckland. – 2002. – Pp. 117–121.
4. Hillery, M. Omni-Directional Vehcile (ODV) by the U.S. Navy URL <http://www.arrickrobotics.com/robomenu/odv.html> (дата доступа: 10.05.2016).
5. Orlando Business Journal article Omnis' wheel of fortune rolls into production by Chad Eric Watt, 31 May 2002
6. KUKA Roboter GmbH KUKA OMNIMOVE Режим доступа: URL <http://www.kuka-omnimove.com/en/> (дата доступа 10.05.2016).
7. Мартыненко, Ю.Г. О движении мобильного робота с роликонесущими колесами / Ю.Г. Мартыненко, А.М. Формальский // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 6. – С. 142–149.

8. Борисов, А.В. Тележка с омниколесами на плоскости и сфере / А.В. Борисов, А.А. Килин, И.С. Мамаев // Нелинейная динамика. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 785–801.
9. Кампион, Г. Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов / Г. Кампион, Ж. Бастен, Б. Д'Андреа-Новель // Нелинейная динамика. – 2011. – Vol. 7. – № 4. – С. 733–769.
10. Nagy, T.K. Near-optimal dynamic trajectory generation and control of an omnidirectional vehicle / T.K. Nagy, R. D'Andrea, P. Ganguly [et. al.] // Robotics and Autonomous Systems. – 2004. – Vol. 47(1). – Pp. 47–64.
11. Nagy, T.K. Real-time trajectory generation for omni-directional vehicle / T.K. Nagy, P. Ganguly, R. D'Andrea // Proceedings of the American Control Conference. – 2002. – Pp. 286–291.
12. Samani, H.A. Design and development of a comprehensive omni directional soccer player robot / H.A Samani, A. Abdollahi, H. Ostadi [et. al.] // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2004. – Vol. 1(3). – Pp. 191–200.
13. Watanabe, K. Feedback control of an omnidirectional autonomous platform for mobile service robots / K. Watanabe, Y. Shiraishi, [et. al.] // J. Intelligent and Robotic Systems. – 1998. – V. 22. – Pp. 315–330.
14. Liu, Y. Omni-directional mobile robot controller based on trajectory linearization / Y. Liu, J.J. Zhu, R.L. Williams II [et. al.]// Robotics and autonomous systems. – 2008. – Vol. 56. – Pp. 461–479.
15. Колесников, А.А. Синергетическая теория управления / А.А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
16. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов / Серия «Анализ и синтез нелинейных систем». - СПб: Наука, 2001. - 227 с.
17. Klilir, P.F. Kinematic modeling of wheeled mobile robots / P.F Klilir, C.P. Neiunan // J. Robotic Systms. – 1987. – №4. – Pp. 340.
18. Velasco-Villa, M. Smith-predictor compensator for a delayed omnidirectional mobile robot / M. Velasco-Villa, B. del-Muro-Cuellar, A. Alvarez-Aguirre // Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on control & Automation, Athene-Greece, 2007.
19. Vazques, J.A. Path-Tracking Dynamical Model Based Control of an Omnidirectional Mobile Robot / J.A. Vazques, M. Velasco-Villa // Proceedings of the 17th World Congress “The International Federation of Automatic Control”, 2008. – Pp. 5365-5373.
20. Huang, H.C. Adaptive Trajectory Tracking and Stabilization for Omnidirectional Mobile Robot with Dynamic Effect and Uncertainties / H.C. Huang, C.C. Tsai // Proceedings of the 17th World Congress “The International Federation of Automatic Control”, 2008. – Pp. 5383-5388.
21. Зобова, А.А. Динамика экипажа с роликонесущими колесами / А.А. Зобова, Я.В. Татаринов // ПММ. – 2009. – Т. 73. – С. 13–22.
22. Нгуен, Н.М. Разработка математической модели погрузочно-разгрузочного устройства с всенаправленными колесами / Н.М. Нгуен // Труды МАИ, 2012. – №58. – 22 с.
23. Андреев, А.С. Синтез непрерывного и кусочно-постоянного управления движение колесного мобильного робота / А.С. Андреев, Е.А. Кудашова, С.Ю. Раков // Научно-техн. вестник Поволжья. – 2014. – №5. – С. 97-100.
24. Андреев А.С., Кудашова Е.А., О моделировании структуры управления для колесного робота с омни-колесами // Автоматизация процессов управления. Издательство: ФНПЦ АО «НПО «Марс» – 2015. – №2. – С. 114-121.
25. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления// Известия ТРТУ. 2006. – Т. 61. – № 6. – С. 10-38.

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КАМЕРЫ В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩИХ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Аннотация. В данной работе был выполнен анализ и синтез системы управления стабилизации камеры в условиях постоянно действующих возмущений. В ходе чего были получены векторные законы управления с использованием СТУ и принципа интегральной адаптации. Полученные законы управления призваны обеспечить асимптотическую устойчивость работы подвеса с учетом внешних возмущений. Было выполнено моделирование выведенных законов управления, подтверждающее выполнение поставленных целей в работе, которое наглядно иллюстрирует производительность синтезированных законов управления.

Ключевые слова: Система стабилизации, синергетический закон управления, асимптотическая устойчивость, интегральная адаптация, подвижный объект, подвес.

Annotation. The paper presents the analysis and synthesis of a camera stabilization control system intended to operate under conditions of permanent external disturbances. During the research vector control laws were deduced which use the synergetic control theory and integral adaptation principle by means of synthesis. The laws deduced are designed to ensure the asymptotic stability of the suspension to stabilize the camera operation under conditions of external disturbances. The computer-generated simulation proves the laws' effectiveness.

Keywords: Stabilization system, synergetic control law, asymptotic stability, integral adaptation, mobile object, gimbal.

Развитие телевидения в 50-х годах XX века способствовало развитию и совершенствованию как носителей фото и видео информации, так и развитию фото и видео съемочной техники. Первая запись электрических импульсов произвилась на магнитную ленту в 1951. В 1960 году лаборатория NASA смогла зашифровать изображение на компьютере. Естественно в 50-х годах фото и видео информация была аналогового вида, но развитие микропроцессорной техники произвело переход к цифровому виду представления.

В настоящее время традиционные средства стабилизации, например штатив, не могут компенсировать внешние негативные факторы как порывы ветра, качка. При съемке может происходить тряска камеры, из-за чего картинка становится размытой, теряется четкость и в результате качество изображения при воспроизведении ухудшается и может привести к не восприятию ее человеком. Поэтому потребность в создании качественно нового класса камер с автоматической стабилизацией изображения является актуальным вопросом.

Стабилизация изображения — это технология, применяемая в фото- и видеосъёмочной технике, механически компенсирующая собственные угловые движения камеры для предотвращения смазывания изображения при больших выдержках («шевелёнки»).

Шевелёнка — фотографический дефект, нечёткость изображения (смазанность, зачастую с двумя или несколькими более чёткими фазами), вызванная движением съемочной техникой, движением объекта съёмки или недостаточная экспозиция.

Во время экспозиции изображения дрожание камеры вызывает движение объектива, сдвигается угол падающего света относительно оптической оси, что приводит к смазыванию изображений.

Существуют два распространенных метода стабилизации изображения:

— оптическая стабилизация изображения (Optical Image Stabilizer, OIS), предложенная фирмой Canon в 1994г.

— электронная (цифровая) стабилизация изображения (Electronic Image Stabilization, EIS),

В целях получения четкой картинки снимаемого изображения и удержания фокуса в заданной точке применяются внешние устройства:

- стэдикам (steadicam) - носимая система стабилизации съёмочной камеры для кино- или видеосъёмки в движении,
- панорамные головки – позволяют поворачивать и наклонять камеру вокруг нодальной точки объектива,
- моторизированная панорамная головка - управление вращением камеры осуществляется джойстиком или с компьютера,
- операторский кран.

В ходе рассмотрения большинства основных способов стабилизации камеры, были выявлены достоинства и недостатки каждого из них. Сравнив, сильные и слабые стороны рассмотренных способов стабилизации, было принято решение использовать в качестве объекта дальнейшего исследования электромеханическую систему стабилизации камеры. Основным критерием принятия данного решения является высокая (относительно других способов стабилизации) точность позиционирования. Однако для достижения полного устранения тряски необходимо выбрать трех осевую систему стабилизации камеры, так как двух осевая обеспечивает стабилизацию на осях тангажа и крена, что является не достаточным для выполнения поставленных задач стабилизации изображения камеры на подвесе.

Следящие системы являются основой функционирования большого числа технических установок, используемых в различных сферах промышленности. Рассматриваемая трех осевая система стабилизации камеры является примером следящей системы, для повышения эффективности которой необходимо разработать автоматическую систему высокоточного сопровождения объекта. При этом данная система должна функционировать при достаточно высоких скоростях сопровождаемых объектов. Однако, для достижения данных характеристик необходимо применение более совершенных методов управления подобными системами. Основными подходами создания алгоритмов управления систем слежения являются: методы нечеткой логики [1], метод искусственных нейронных сетей [1], методы построения пропорционально-интегрально-дифференцирующих регуляторов. Главным недостатком представленных подходов является необходимость иметь априорную информацию о рабочей среде объекта управления что, в свою очередь, накладывает ограничение на область применения подобных систем определенным множеством различных ситуаций. Также в данных подходах не учитывается внутренняя динамика объектов управления и исполнительных приводов следящей системы.

С целью преодоления данных недостатков настоящее время была сформирована новая прикладная синергетическая теория управления (СТУ) [2] использующая принцип направленной самоорганизации. В рамках данной теории был разработан метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [3], позволяющий синтезировать законы управления для расширенных математических моделей объектов управления без линеаризации или других упрощений. В данном методе цели задачи управления выступают в виде инвариантных многообразий, а учет нелинейной динамики системы достигается путем применения асимптотического перехода от одного инвариантного многообразия к другому с последовательным понижением размерности многообразий. При таком подходе к задаче управления нет необходимости строгого соответствия параметров реального объекта параметрам заложенной в регулятор модели, нужно лишь обеспечить попадание замкнутой системы в область притяжения инвариантных многообразий, на которых, в свою очередь, поддерживается желаемое конечное состояние объекта управления. Применительно к управлению системой стабилизации камеры на подвесе, конечные цели можно представить в виде притягивающих многообразий – аттракторов, являющихся вектором желаемых углов поворота камеры.

Таким образом, целью работы является создание синергетического закона управления системы стабилизации камеры, в условиях постоянно действующих внешних возмущений, обеспечивающего поддержание заданного устойчивого положения видеокамеры при осуществлении видеосъемки.

В состав трехосного подвеса камеры входит платформа, наружная и промежуточная рамы подвеса с перпендикулярными в среднем расположении скрещивающимися осями вращения,

приводы вращения рам и платформы, соединенные с источником сигнала управления. Промежуточная рама подвеса имеет вид механического параллелограмма, в состав которого входят подвижно соединенные основание параллелограмма, шатун и два кривошипа, имеющие оси вращения, параллельные осям вращения промежуточной рамы. На конце каждого кривошипа зафиксировано мобильное механическое звено. Другой конец каждого мобильного механического звена зафиксирован с возможностью вращения вокруг оси, параллельной осям вращения кривошипов. Сопряженные наружная рама подвеса, основание параллелограмма, пара мобильных механических звеньев и кривошипы тоже являются собой два параллелограмма. Платформа зафиксирована на шатуне таким образом, что допускает возможность вращения, а ось вращения платформы ортогональна осям вращения шатуна по отношению к кривошипам. Схема подвеса видеокамеры приведена на рисунке 1.

В качестве технического результата, обеспечиваемого данной разработкой, является увеличение точности обеспечения углового положения платформы и камеры в подвесе, усовершенствование действующих характеристик подвеса при увеличении его технических показателей, например, при уменьшении возмущающих моментов, вызванных подвесом в следствие симметричной конструктивной реализации наружной и промежуточной рам подвеса, а также такого размещения конструктивных компонентов подвеса, при котором они не будут лимитировать продольный размер камеры с объективом, установленной на платформе [4].

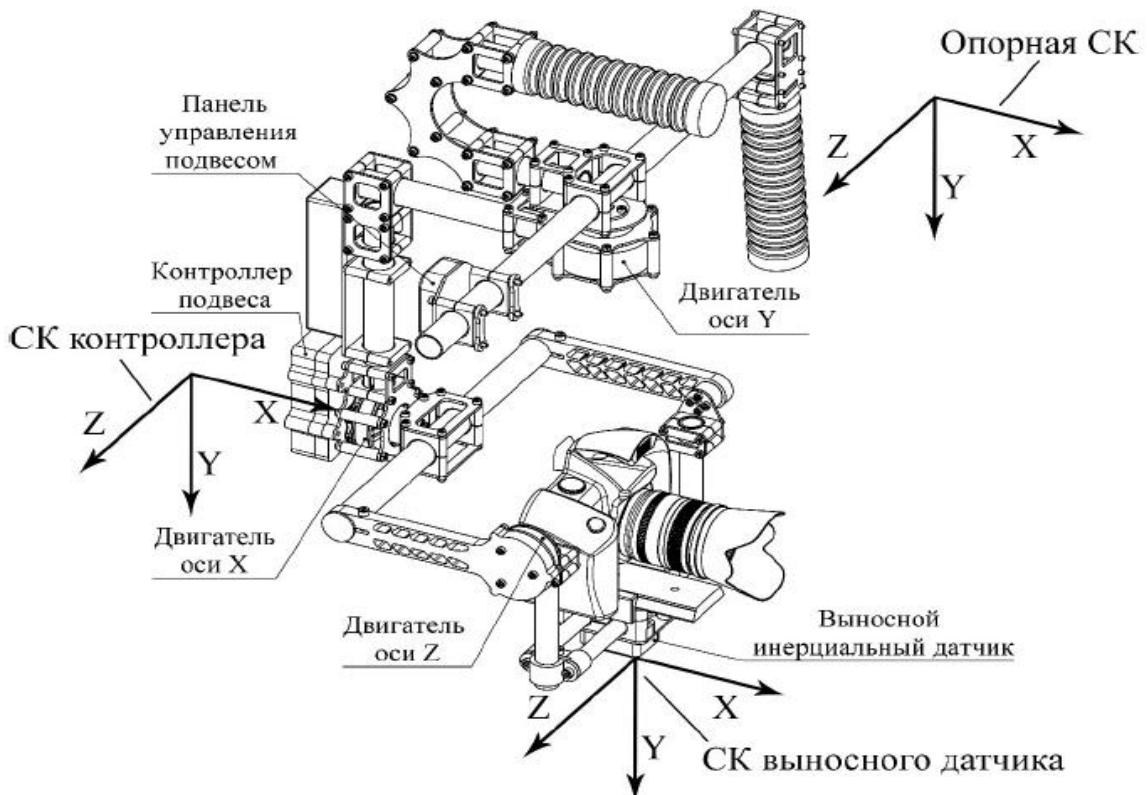


Рисунок 1 – Схема подвеса видеокамеры

Динамика поведения трех-осевого подвеса видеокамеры описывается следующей системой дифференциальных уравнений [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I_{11}} \omega_1 = Nm_1 + k_{w1} ((\cos \theta_G \cos \psi_G \omega_{XB} + \cos \theta_G \sin \psi_G \omega_{YB} - \sin \theta_G \omega_{ZB}) - \omega_1) \\ - \omega_2 h_0 \cos \phi_G - \omega_3 h_0 \sin \phi_G \cos \theta_G; \\ \dot{I_{22}} \omega_2 = Nm_2 + k_{w2} ((-\omega_{XB} \sin \psi_G + \omega_{YB} \cos \psi_G) - \omega_2) + \omega_1 h_0 \cos \phi_G \\ - \omega_3 h_0 \cos \phi_G \sin \theta_G; \\ \dot{I_{33}} \omega_3 = Nm_3 + k_{w3} (\omega_{ZB} - \omega_3) + \omega_1 h_0 \sin \phi_G \cos \theta_G + \omega_2 h_0 \cos \phi_G \sin \theta_G; \\ \dot{\phi} = \omega_1 + \omega_2 \sin(\phi) \tan(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \tan(\theta); \\ \dot{\theta} = \omega_2 \cos(\phi) - \omega_3 \sin(\phi); \\ \dot{\psi} = \omega_2 \sin(\phi) \sec(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \sec(\theta); \end{array} \right. \quad (1)$$

где ω_i – угловые скорости; θ – угол поворота по оси y; ϕ – угол поворота по оси x; ψ – угол поворота по оси z; I – момент инерции; Nm_i – управляющие моменты (сервоприводы); h – момент импульса маховика, k_{wi} – коэффициенты трения; переменные состояния: ω_i , ϕ , θ , ψ ; управляющие воздействия: Nm_i .

Параметры модели указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модели

Обозначение	Единицы измерения	Параметры
I_{11}	$\text{кг}^*\text{м}$	$6.441*10^{-3}$
I_{22}	$\text{кг}^*\text{м}$	$7.475*10^{-3}$
I_{33}	$\text{кг}^*\text{м}$	$1.39691*10^{-2}$
h	$\text{Н}^*\text{м}^*\text{с}$	0.13132
k_{w1}	$\text{Н}/\text{м}^*\text{с}^1$	$4.5*10^{-3}$
k_{w2}	$\text{Н}/\text{м}^*\text{с}^1$	$4*10^{-3}$
k_{w3}	$\text{Н}/\text{м}^*\text{с}^1$	$4*10^{-3}$
ω_{XB}		$0.205 \sin \frac{\pi}{8} t$
ω_{YB}		$0.274 \sin \frac{\pi}{3} t$
ω_{ZB}		$0.55 \sin \frac{\pi}{10} t$

В СТУ совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Инварианты выступают в роли цели управления, на них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи, а процедура синергетического синтеза сводится к поиску законов управления, при которых эти заданные инварианты выполняются. В качестве инвариантов для следящей системы подвеса выберем угловое смещение платформы в заданные значения ϕ_z , θ_z , ψ_z . Таким образом, подмножество целей для системы будет иметь вид

$$\Sigma_1 = \{\phi = \phi_z, \theta = \theta_z, \psi = \psi_z\}. \quad (5)$$

Применим метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) для осуществления синергетического управления. Метод АКАР опирается концепцию введения притягивающих ИМ $\Psi_s(x_1, \dots, x_n)$, на которых лучшим образом согласуются естественные (механические, энергетические, тепловые и др.) свойства объекта и требования задачи управления. Для подавления внешних возмущений применим принцип интегральной адаптации [6 – 8]. Интегральная адаптация — метод, с помощью которого можно подавить возмущения полиномиального характера. Что бы определить количество необходимых интеграторов необходимо прибавить единицу к высшей степени полинома, который описывает возмущение. Для подавления гармонических возмущений можно использовать этот метод, но результат будет с погрешностью, для уменьшения погрешности нужно вводить больше интеграторов. Иными словами, принцип интегральной адаптации и заключается в построении гарантирующих регуляторов.

Сделаем синтез закона управления в соответствии с принципом интегральной адаптации, для обеспечения подавления постоянных внешних возмущений в виде трения. Сначала, построим расширенную систему. Для этого к модели подвеса камеры добавляются модели оценки соответствующих возмущений. В уравнениях объекта, в которых присутствуют возмущения, добавляется выходная переменная модели соответствующего возмущения.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \eta * (\phi - \phi_z); \\ \dot{z}_2 &= \eta * (\theta - \theta_z); \\ \dot{z}_3 &= \eta * (\psi - \psi_z). \end{aligned} \quad (2)$$

Дополним исходную модель (1) уравнениями (2).

Расширим исходную модель, добавив по одному интегратору на возмущения. На данном этапе примем характер возмущений в виде кусочно-постоянной функции.

Расширенная модель имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_1 = Nm_1 + k_{w1} ((\cos \theta_G \cos \psi_G \omega_{XB} + \cos \theta_G \sin \psi_G \omega_{YB} - \sin \theta_G \omega_{ZB}) - \omega_1) \\ \quad - \omega_2 h_0 \cos \phi_G - \omega_3 h_0 \sin \phi_G \cos \theta_G; \\ \dot{\omega}_2 = Nm_2 + k_{w2} ((-\omega_{XB} \sin \psi_G + \omega_{YB} \cos \psi_G) - \omega_2) + \omega_1 h_0 \cos \phi_G \\ \quad - \omega_3 h_0 \cos \phi_G \sin \theta_G; \\ \dot{\omega}_3 = Nm_3 + k_{w3} (\omega_{ZB} - \omega_3) + \omega_1 h_0 \sin \phi_G \cos \theta_G + \omega_2 h_0 \cos \phi_G \sin \theta_G; \\ \dot{\phi} = \omega_1 + \omega_2 \sin(\phi) \tan(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \tan(\theta); \\ \dot{\theta} = \omega_2 \cos(\phi) - \omega_3 \sin(\phi); \\ \dot{\psi} = \omega_2 \sin(\phi) \sec(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \sec(\theta); \\ \dot{z}_1 = \eta * (\phi - \phi_z); \\ \dot{z}_2 = \eta * (\theta - \theta_z); \\ \dot{z}_3 = \eta * (\psi - \psi_z), \end{array} \right. \quad (3)$$

где z_i – динамические переменные синтезируемого закона управления, выполняющие роль оценок возмущений, действующих на систему, η_i – постоянные коэффициенты. В правой части переменных z_i отражена структура технологических инвариантов. Для расширенной модели (3) введем макропеременные:

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= w_1 - \Phi_1(w_2, w_3); \\ \Psi_2 &= w_2 - \Phi_2(w_1, w_3); \\ \Psi_3 &= w_3 - \Phi_3(w_1, w_2);\end{aligned}\quad (4)$$

где $\Phi_1(w_2, w_3)$, $\Phi_2(w_1, w_3)$, $\Phi_3(w_1, w_2)$ «внутренние» управления системы.

Что бы найти синергетический закон управления повторим процедуру синтеза и введем набор макропеременных (4), согласно СТУ [2,8], соответствующих инвариантным соотношениям $\Psi_1 = 0$, реализующих желаемый режим работы объекта управления.

Для выполнения совокупности инвариантных соотношений (4) $\Psi_1 = 0$ необходимо ввести следующую систему основные функциональные уравнения:

$$\begin{aligned}T_1 \dot{\Psi}_1 + \Psi_1 &= 0; \\ T_2 \dot{\Psi}_2 + \Psi_2 &= 0; \\ T_3 \dot{\Psi}_3 + \Psi_3 &= 0.\end{aligned}$$

Декомпозированная система на пересечении многообразий имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\phi} = \Phi_1(w_2, w_3, z_1, z_2, z_3) + \omega_2 \sin(\phi) \tan(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \tan(\theta); \\ \dot{\theta} = \Phi_2(w_1, w_3, z_1, z_2, z_3) \cos(\phi) - \omega_3 \sin(\phi); \\ \dot{\psi} = \omega_2 \sin(\phi) \sec(\theta) + \Phi_3(w_1, w_2, z_1, z_2, z_3) \cos(\phi) \sec(\theta); \\ \dot{z}_1 = \eta * (\phi - \phi_z); \\ \dot{z}_2 = \eta * (\theta - \theta_z); \\ \dot{z}_3 = \eta * (\psi - \psi_z). \end{array} \right. \quad (5)$$

Для полученной системы (5), так же введем набор макропеременных, соответствующих инвариантным соотношениям $\Psi_1 = 0$, реализующих желаемый режим работы объекта управления:

$$\begin{aligned}\Psi_4 &= (\phi - \phi_z) + \beta * z_1; \\ \Psi_5 &= (\theta - \theta_z) + \beta * z_2; \\ \Psi_6 &= (\psi - \psi_z) + \beta * z_3.\end{aligned}$$

Следуя процедуре синтеза методом АКАР, из решения функциональных уравнений:

$$\begin{aligned}T_4 \dot{\Psi}_4 + \Psi_4 &= 0; \\ T_5 \dot{\Psi}_5 + \Psi_5 &= 0; \\ T_6 \dot{\Psi}_6 + \Psi_6 &= 0.\end{aligned}$$

Подставив в модель (3.12) параметры из таблицы 1. Примем $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 10$, выведем законы управления. В качестве параметров полученного регулятора возьмем следующие значения, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры регулятора

Параметр	Обозначение	Значение
Параметр 1-го функционального уравнения	T_1	0.01
Параметр 2-го функционального уравнения	T_2	0.01
Параметр 3-го функционального уравнения	T_3	0.01
Параметр 4-го функционального уравнения	T_4	0.01
Параметр 5-го функционального уравнения	T_5	0.01
Параметр 6-го функционального уравнения	T_6	0.01
Параметры макропеременных	$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	0.05

Предположим, что на объект управления влияют кусочно-постоянные неопределенные (для замкнутой системы управления) внешние возмущающие воздействия, которые описываются выражениями:

$$\begin{cases} 0, \text{при } t > 0 \text{ и } t < 10; \\ 1, \text{при } t > 10 \text{ и } t < 20, \text{при } t > 40; \\ 2, \text{при } t > 20 \text{ и } t < 40. \end{cases}$$

Кусочно-постоянные внешние возмущения являются наихудшим видом возмущений для подвижных объектов. Такие возмущения можно сравнить с резким торможением подвижного объекта или резким порывом ветра.

Зададим системе стандартные значения параметров, а возмущение зададим кусочно-постоянной функцией, начинающей действие на систему соответственно с 10-й, 20-й и 40-й секунды, и промоделируем замкнутую систему.

Кусочно-постоянное воздействие показано на рисунке 2.

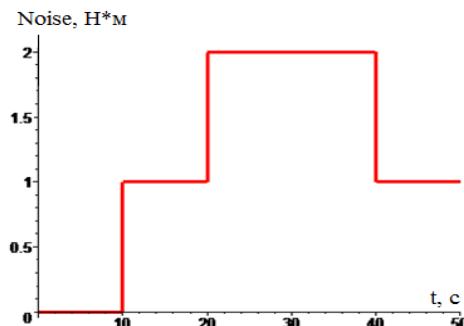


Рисунок 2 – Кусочно-постоянное воздействие

В результате моделирования были получены результаты, представленные на рисунках 3 – 8, подтверждающие теоретические положения.

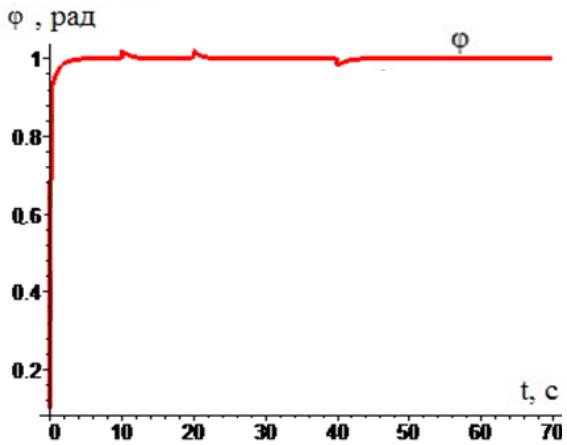


Рисунок 3 – Графики переходных процессов переменной состояния ϕ

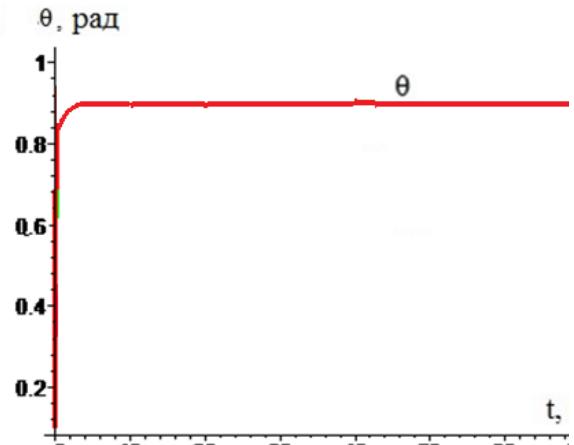


Рисунок 4 – Графики переходных процессов переменной состояния θ

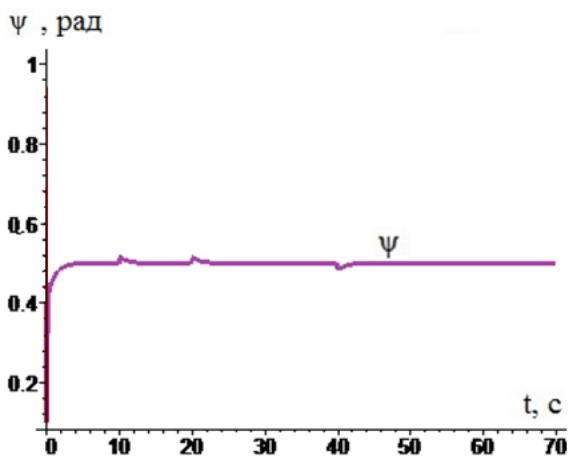


Рисунок 5 – Графики переходных процессов переменной состояния ψ

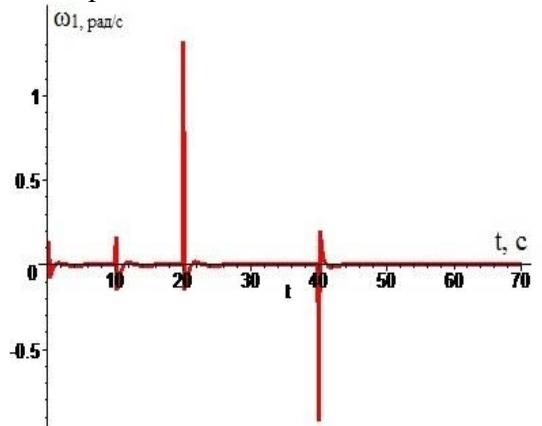


Рисунок 6 – Графики переходных процессов угловой скорости ω_1

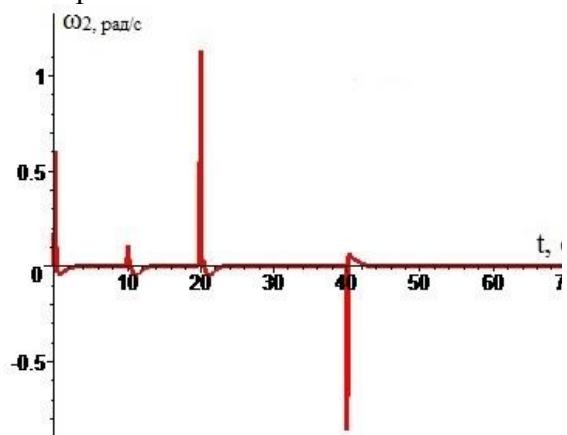


Рисунок 7 – Графики переходных процессов угловой скорости ω_2

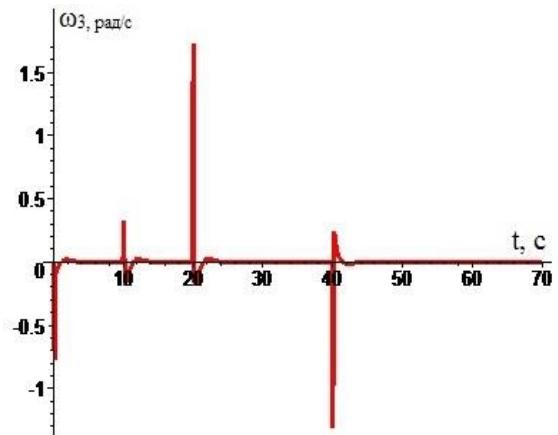


Рисунок 8 – Графики переходных процессов угловой скорости ω_3

Полученные законы управления успешно выводят и удерживают синтезированную замкнутую систему стабилизации камеры. Так же обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов: подавление кусочно-постоянных внешних возмущений и стабилизации камеры по осям. Следовательно, регулятор синтезированный методом интегральной адаптации позволяет управлять в условиях постоянных внешних возмущений. Настройка параметров регулятора с

учетом ограничений, зависящих от моделей, позволит оптимизировать время переходных процессов.

Далее, рассмотрим применение метода интегральной адаптации при постоянных возмущениях в виде линейной функции, которые возникают, например, при повороте объекта, на котором закреплен подвес с камерой. Расширим исходную модель, добавив по два интегратора на возмущения.

Расширенная модель будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\omega}_1 = Nm_1 + k_{w1}((\cos\theta_G \cos\psi_G \omega_{XB} + \cos\theta_G \sin\psi_G \omega_{YB} - \sin\theta_G \omega_{ZB}) - \omega_1) \\ \quad - \omega_2 h_0 \cos\phi_G - \omega_3 h_0 \sin\phi_G \cos\theta_G; \\ \dot{\omega}_2 = Nm_2 + k_{w2}((- \omega_{XB} \sin\psi_G + \omega_{YB} \cos\psi_G) - \omega_2) + \omega_1 h_0 \cos\phi_G \\ \quad - \omega_3 h_0 \cos\phi_G \sin\theta_G; \\ \dot{\omega}_3 = Nm_3 + k_{w3}(\omega_{ZB} - \omega_3) + \omega_1 h_0 \sin\phi_G \cos\theta_G + \omega_2 h_0 \cos\phi_G \sin\theta_G; \\ \dot{\phi} = \omega_1 + \omega_2 \sin(\phi) \tan(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \tan(\theta); \\ \dot{\theta} = \omega_2 \cos(\phi) - \omega_3 \sin(\phi); \\ \dot{\psi} = \omega_2 \sin(\phi) \sec(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \sec(\theta); \\ \cdot \\ z_1 = z_4; \\ \cdot \\ z_2 = z_5; \\ \cdot \\ z_3 = z_6; \\ \cdot \\ z_4 = \eta^*(\phi - \phi_z); \\ \cdot \\ z_5 = \eta^*(\theta - \theta_z); \\ \cdot \\ z_6 = \eta^*(\psi - \psi_z), \end{array} \right. \quad (6)$$

Повторим процедуру синтеза, описанную ранее. Введем набор макропеременных для расширенной модели (6), согласно СТУ [2,8], соответствующих инвариантным соотношениям $\Psi_1 = 0$, реализующих желаемый режим работы объекта управления:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= w_1 - \Phi_1(w_2, w_3); \\ \Psi_2 &= w_2 - \Phi_2(w_1, w_3); \\ \Psi_3 &= w_3 - \Phi_3(w_1, w_2); \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Phi_1(w_2, w_3)$, $\Phi_2(w_1, w_3)$, $\Phi_3(w_1, w_2)$ «внутренние» управления системы.

Для выполнения совокупности инвариантных соотношений (7) $\Psi_1 = 0$ необходимо ввести следующую систему основных функциональных уравнений:

$$T_1 \dot{\Psi}_1 + \Psi_1 = 0;$$

$$T_2 \dot{\Psi}_2 + \Psi_2 = 0;$$

$$T_3 \dot{\Psi}_3 + \Psi_3 = 0;$$

Декомпозированная система на пересечении многообразий имеет следующий вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\phi} = \omega_1 + \omega_2 \sin(\phi) \tan(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \tan(\theta); \\ \dot{\theta} = \omega_2 \cos(\phi) - \omega_3 \sin(\phi); \\ \dot{\psi} = \omega_2 \sin(\phi) \sec(\theta) + \omega_3 \cos(\phi) \sec(\theta); \\ \cdot \\ z_1 = z_4; \\ \cdot \\ z_2 = z_5; \\ \cdot \\ z_3 = z_6; \\ \cdot \\ z_4 = \eta * (\phi - \phi_z); \\ \cdot \\ z_5 = \eta * (\theta - \theta_z); \\ \cdot \\ z_6 = \eta * (\psi - \psi_z). \end{array} \right. \quad (8)$$

Для декомпозированной модели (3.15) введем макропеременные:

$$\Psi_4 = (\phi - \phi_z) + \beta_{11} * z_1 + \beta_{12} * z_4;$$

$$\Psi_5 = (\theta - \theta_z) + \beta_{21} * z_2 + \beta_{22} * z_5;$$

$$\Psi_6 = (\psi - \psi_z) + \beta_{31} * z_3 + \beta_{32} * z_6.$$

Следуя процедуре синтеза методом АКАР, из решения функциональных уравнений:

$$T_4 \dot{\Psi}_4 + \Psi_4 = 0;$$

$$T_5 \dot{\Psi}_5 + \Psi_5 = 0;$$

$$T_6 \dot{\Psi}_6 + \Psi_6 = 0.$$

Подставив в модель (6) параметры из таблицы 2. Примем $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 2$, выведем законы управления. В качестве параметров полученного регулятора возьмем следующие значения, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры регулятора

Параметр	Обозначение	Значение
Параметр 1-го функционального уравнения	T ₁	0.01
Параметр 2-го функционального уравнения	T ₂	0.01
Параметр 3-го функционального уравнения	T ₃	0.01
Параметр 4-го функционального уравнения	T ₄	0.05
Параметр 5-го функционального уравнения	T ₅	0.05
Параметр 6-го функционального уравнения	T ₆	0.05
Параметры интегральной адаптации	β_{11}	1
	β_{12}	5
	β_{21}	1

β_{22}	5
β_{31}	1
β_{32}	5

Зададим системе стандартные значения параметров, а возмущение линейной функцией, которая зависит от времени – рисунок 9.

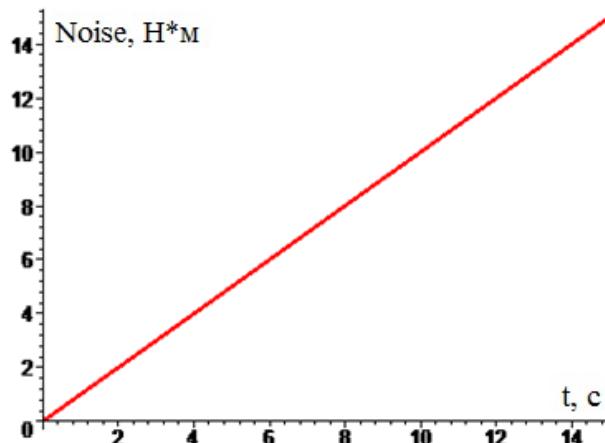


Рисунок 9 – Линейная функция

Данные результаты моделирования, представленные на рисунках 10 – 15, не противоречат тезису о подавлении синтезированным регулятором линейного внешнего возмущения. Это происходит благодаря выполнению введенной системы инвариантов.

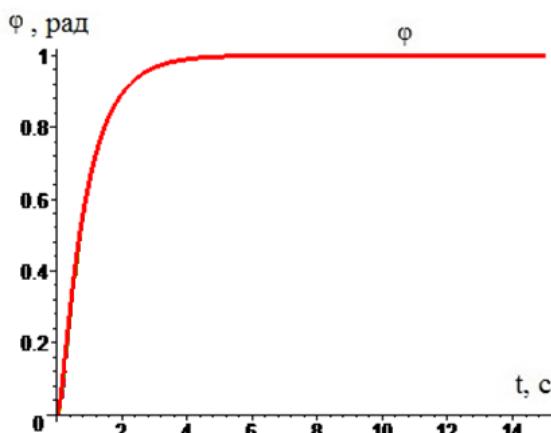


Рисунок 10 – Графики переходных процессов переменной состояния ϕ

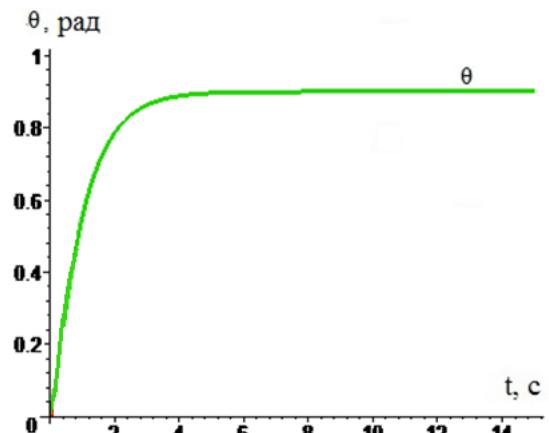


Рисунок 11 – Графики переходных процессов переменной состояния θ

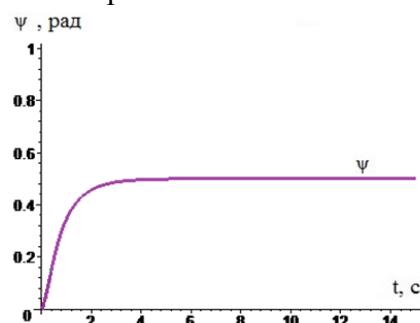


Рисунок 12 – Графики переходных процессов переменной состояния ψ

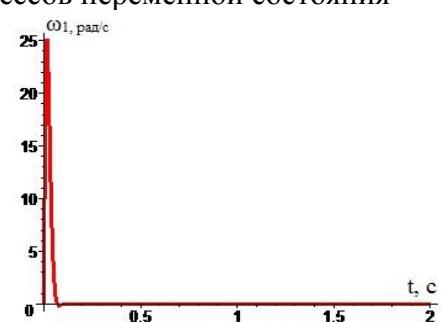


Рисунок 13 – Графики переходных процессов угловой скорости ω_1

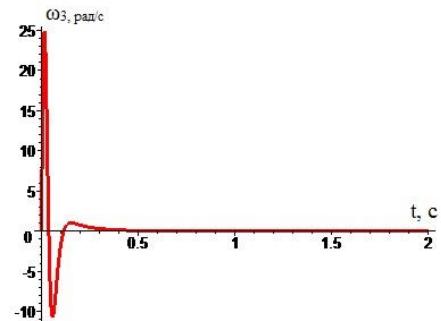


Рисунок 14 - Графики переходных процессов угловой скорости ω_2

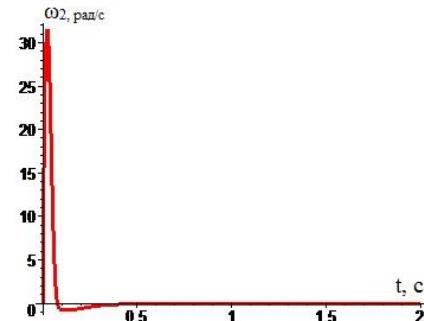


Рисунок 15 - Графики переходных процессов угловой скорости ω_3

Таким образом, основной результат исследования заключается в получении синергетического закона управления системой стабилизации камеры, в условиях постоянно действующих внешних возмущений, который обеспечивает поддержание заданного устойчивого положения видеокамеры при осуществлении видеосъемки. Разработанный закон управления обеспечивают глобальную асимптотическую устойчивость замкнутой системы в рамках допустимых условий функционирования объекта управления. Эффективность полученного управления была достигнута за счет учета нелинейных свойств объекта управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логики и искусственные нейронные сети [Текст] / Учеб. пособие. - М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. - 224 с.
2. Колесников, А.А. Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем [Текст] / А. А. Колесников. – М.: Энергомиздат, 1987.
3. Веселов, Г.Е. Синергетический подход к синтезу иерархических систем управления [Текст] / Г.Е. Веселов // Известия ТРГУ. – 2006. – Т. 61. – № 6. – С. 73-84.
4. Трехосный подвес камеры. [Электронный ресурс] / Сайт компании "FindPatent.ru". – Режим доступа: URL <http://www.findpatent.ru/patent/248/2489747.html> (дата доступа: 20.05.2017).
5. Bredenkamp, A.F.L.Developmentandcontrolof 3-axisstabilizedplatform. [Text] / A. F. L. Bredenkamp. // UniversityofStellenbosch. – 2007. – Рп. 10-22.
6. Веселов, Г.Е. Синергетическое управление иерархическими структурами манипуляционных роботов [Текст] / Г. Е. Веселов // Сборник докладов 2-й всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии». – Пятигорск, 2004. – Т. 1. – С. 184-198.
7. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы [Текст] / А.А. Колесников, Г.Е. Веселов, А.Н. Попов [и др.]. – М.: КомКнига, 2006. – 304 с.
8. Колесников, А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления [Текст] / А.А. Колесников // Известия ТРГУ. – 2006. – Т. 61. – № 6. – С. 10-38.

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ АДАПТИВНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Аннотация. В работе рассматривается проблема синтеза законов управления пространственным движением автономного подводного аппарата (АПА). Задачами синтеза являются выход АПА на заданную глубину и движение на этой глубине с постоянными скоростью, заданным курсом и нулевым креном. С использованием принципа интегральной адаптации построен гарантирующий регулятор, компенсирующий возможные внешние возмущения. Еще одна задача, рассматриваемая в данной работе – подавление внешнего возмущения посредством его оценивания, на основе процедуры синтеза синергетических наблюдателей.

Ключевые слова: Автономный подводный аппарат, система автоматического управления, математическая модель, метод АКАР, инварианты, инвариантное многообразие, функциональное уравнение, синергетическая теория управления, интегральная адаптация, синергетический наблюдатель.

Annotation. The problem of control laws synthesis for autonomous underwater vehicle (AUV) spatial motion is considered in this paper. Found control system solves the problem of the underwater device transition to a predetermined depth and provides the device motion at this depth with constant speed, with predetermined course and zero heel. A guarantee controller that compensates the possible external disturbances has been constructed with the use of principle of integral adaptation. Another problem considered in this paper is the suppression of external disturbance by means of its estimation based on the procedure for synthesizing synergetic observers.

Keywords: Autonomous underwater vehicles, automatic control systems, mathematical models, methods ACAR invariant, invariant manifolds, functional equations, synergetic control theory, integral adaptation, synergistic observer.

Человечество на протяжении многих веков стремится к освоению подводного пространства. Исследования морских глубин стали возможны именно благодаря подводным аппаратам (ПА). Подводные аппараты должны выполнять поставленные задачи, учитывать состояние окружающей среды и реагировать на воздействие внешних возмущений. С этими задачами лучше всего справляются автономные подводные аппараты (АПА) – высокоманевренные и жизнеспособные морские объекты, способные выполнять широкий круг задач по освоение мирового океана. Обладая более выгодными по сравнению с обитаемыми подводными аппаратами характеристиками: меньшей массой, и габаритами, низкой стоимостью, большей продолжительностью непрерывной работы под водой. Проблема управления движением автономных подводных аппаратов актуальна и в наши дни. Многие специалисты по автоматике заинтересованы данной темой [1-10]. Научная новизна и цель данной работы заключаются в использовании метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [11-14] для синтеза законов векторного управления движением автономного подводного аппарата в вертикальной плоскости. В рамках этого метода возможна работа с полной нелинейной моделью движения. Анализ движения объекта можно проводить с учетом всех координат системы, то есть в отличие от традиционного подхода – конструирования отдельного стабилизирующего управления для каждого канала регулирования, в этом подходе используется совместное управление по всем переменным с целью перевода объекта в желаемое состояние. В этом случае для ряда вариантов алгоритмов управления связи между каналами управления осуществляются не косвенно, через объект управления, а непосредственно формируются в регуляторе.

Математическая модель (1) пространственного движения АПА имеет следующий вид [15]:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \frac{u_1 - 0.5 p V^2 v^{2/3} (-c_x^\alpha x_2 / V + c_x^\delta x_3 / V + c_x^{\delta_\Gamma} u_2 + c_x^{\delta_B} u_3) - m_z x_5 x_3 + m_y x_6 x_2}{m_x} + M_{dist}, \\
\dot{x}_2 &= \frac{0.5 p V^2 v^{2/3} (-c_y^\alpha x_2 / V + c_y^{\omega_z} x_6 + c_y^{\delta_\Gamma} u_2) - m_x x_6 x_1 + m_z x_4 x_3}{m_y}, \\
\dot{x}_3 &= \frac{0.5 p V^2 v^{2/3} (c_z^\beta x_3 / V + c_z^{\omega_y} x_5 + c_z^{\delta_B} u_3) - m_y x_4 x_2 + m_x x_5 x_1}{m_z}, \\
\dot{x}_4 &= \frac{0.5 p V^2 v (m_x^\beta x_3 / V + m_x^{\omega_x} x_4 + m_x^{\Delta\delta_\Gamma} u_4)}{J_x}, \\
\dot{x}_5 &= \frac{0.5 p V^2 v (m_y^\beta x_3 / V + m_y^{\omega_x} x_5 + m_y^{\delta_B} u_3) - x_4 x_6 (J_x - J_z) - x_1 x_3 (m_x - m_z)}{J_y}, \\
\dot{x}_6 &= \frac{0.5 p V^2 v (-m_z^\alpha x_2 / V + m_z^{\omega_z} x_6 + m_z^{\delta_\Gamma} u_2) - x_4 x_5 (J_x - J_y) - x_1 x_2 (m_y - m_x)}{J_z}, \\
\dot{x}_7 &= x_1 - x_2 x_{12} + x_3 x_{11}, \\
\dot{x}_8 &= x_1 x_{12} + x_2 - x_3 x_{10}, \\
\dot{x}_9 &= -x_1 x_{11} + x_2 x_{10} + x_3, \\
\dot{x}_{10} &= \frac{x_4 + x_4 x_{10} x_{12} - x_5 x_{12} + x_6 x_{12}^2}{1 + x_{10} x_{12}}, \\
\dot{x}_{11} &= \frac{x_5 - x_6 x_{12}}{1 + x_{10} x_{12}}, \\
\dot{x}_{12} &= \frac{x_6 + x_5 x_{11}}{1 + x_{10} x_{12}}. \tag{1}
\end{aligned}$$

С учетом переменных состояния $x_1 = V_x$, $x_2 = V_y$, $x_3 = V_z$, $x_4 = \omega_x$, $x_5 = \omega_y$, $x_6 = \omega_z$, $x_7 = x_g$, $x_8 = y_g$, $x_9 = z_g$, $x_{10} = \theta$, $x_{11} = \psi$, $x_{12} = \varphi$ и управляющих воздействий $u_1 = T$, $u_2 = \delta_\Gamma$, $u_3 = \delta_\epsilon$, $u_4 = \Delta\delta_\Gamma$.

Переменные V_x , V_y , V_z и ω_x , ω_y , ω_z – проекции на оси связанной системы координат вектора линейной скорости перемещения центра масс автономного подводного аппарата и вектора угловой скорости вращения автономного подводного аппарата относительно центра масс; x_g , y_g , z_g – координаты центра масс АПА в базовой системе координат; ψ – угол дифферента; θ – угол крена, φ – угол рыскания, m_x , m_y , m_z , J_x , J_y , J_z – элементы матрицы инерции твердого тела с учетом присоединенных масс жидкости; c_i^j и m_i^j – гидродинамические коэффициенты; $\alpha \approx -V_y / V$ – угол атаки; $\beta \approx V_z / V$ – угол дрейфа; $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ – скорость поступательного

движения; q – скоростной напор, зависящий от плотности воды и скорости движения $q = 0.5 \rho V^2$, v – объемное водоизмещение аппарата; T – сила тяги по продольной оси OX , создаваемая тяговым двигателем; δ_e – угол перекладки вертикального руля, δ_f – гидродинамический дифферентирующий момент управления, $\Delta\delta_f$ – гидродинамический кренящий момент управления, M_{dist} – внешнее возмущение.

Согласно процедуре метода АКАР был синтезирован регулятор, обеспечивающий выполнение следующих целей: на заданную глубину и движение на этой глубине с постоянными скоростью, заданным курсом и нулевым креном. Для заданных инвариантов $x_1^* = 1, x_8^* = -10, x_{10}^* = 0, x_{11}^* = 2.5$ системы; при начальных условия: $x_1 = 0.001$, т.к. скорость V_x не должна быть равна нулю в связи с математической моделью АПА, остальные переменные состояния были нулевыми; и внешнем возмущении $M_{dist} = 0$ графики переходных процессов переменных состояния и управляющих воздействий представлены на рисунках 1 – 4.

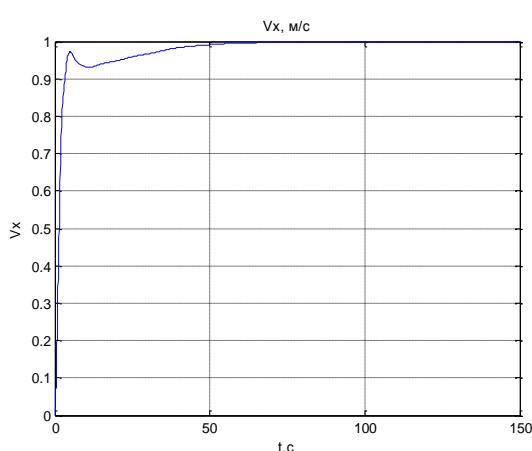


Рисунок 1 – График проекции на ось ОХ вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА

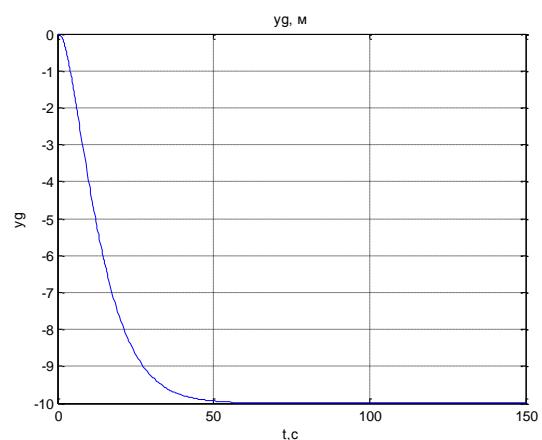


Рисунок 2 – График координаты y_g центра масс АПА в базовой системе координат

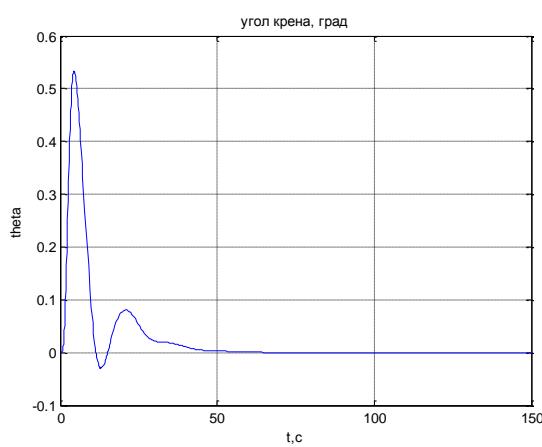


Рисунок 3 – График угла крена

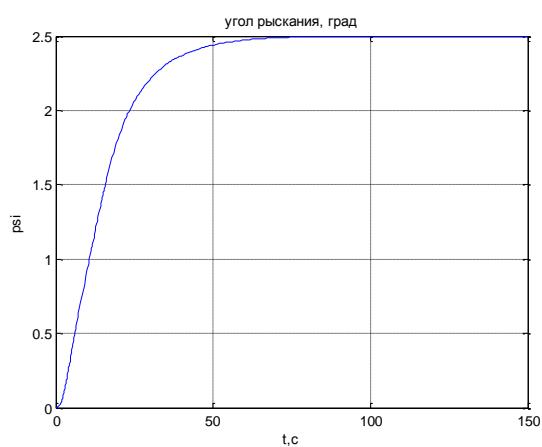


Рисунок 4 – График угла рыскания

По графикам, представленным на рисунках 1 – 4 видно, что синтезированный регулятор выполняет поставленные задачи.

Для синтеза точных управляющих регуляторов, необходимо иметь полную информацию, как о переменных состояния объекта, так и о внешних возмущающих воздействиях, действующих на систему. Это возможно не всегда, поэтому применена процедура синергетического синтеза динамических регуляторов с асимптотическими наблюдателями. В этом случае возможно подавление неизвестного кусочно-постоянного внешнего возмущения посредством его оценивания и учета в регуляторе. Используемая в работе методика, подробно описана в [11, 14].

При этом в процедуре синтеза используется расширенная модель рассматриваемого объекта, которая кроме динамики управляемого объекта описывает еще и предполагаемый класс возмущений, задающих воздействий. Таким образом, в вышеуказанную модель (1) добавлено уравнение производной возмущения $\dot{w}_1(t) = 0$. Синтез регулятора проводился в матричной форме.

Для заданных инвариантов $x_1^* = 1, x_8^* = -10, x_{10}^* = 0, x_{11}^* = 2.5$ и внешнем меняющемся кусочно-постоянном возмущении $w_1 = -0.1$, с 150-й секунды $w_1 = -0.2$, с 200-й секунды $w_1 = 0.1$, с начальными условиями, как при предыдущем моделировании, графики переходных процессов переменных состояния, управляющих воздействий и оцененного внешнего возмущения представлены на рисунках 5 – 7.

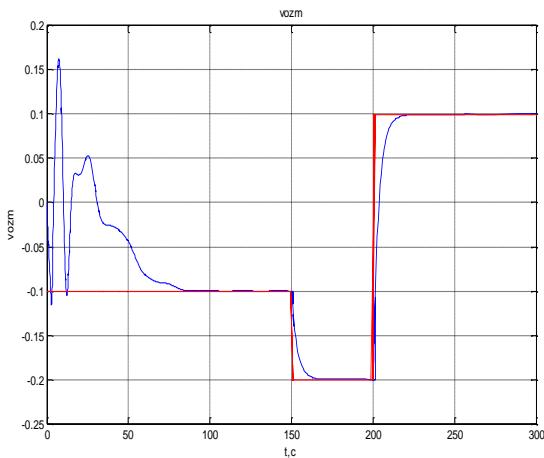


Рисунок 5 – График внешнего возмущающего воздействия и его оценивания

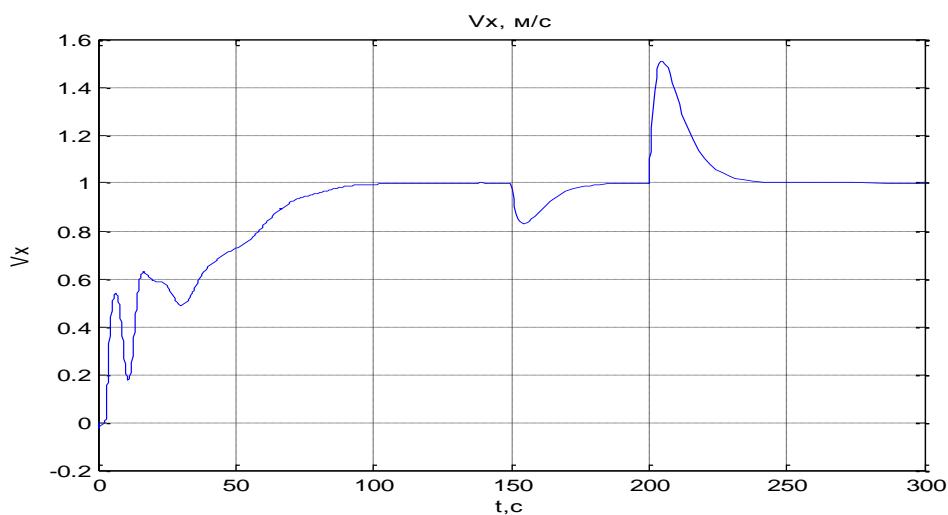


Рисунок 6 – График проекции на ось ОХ вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА

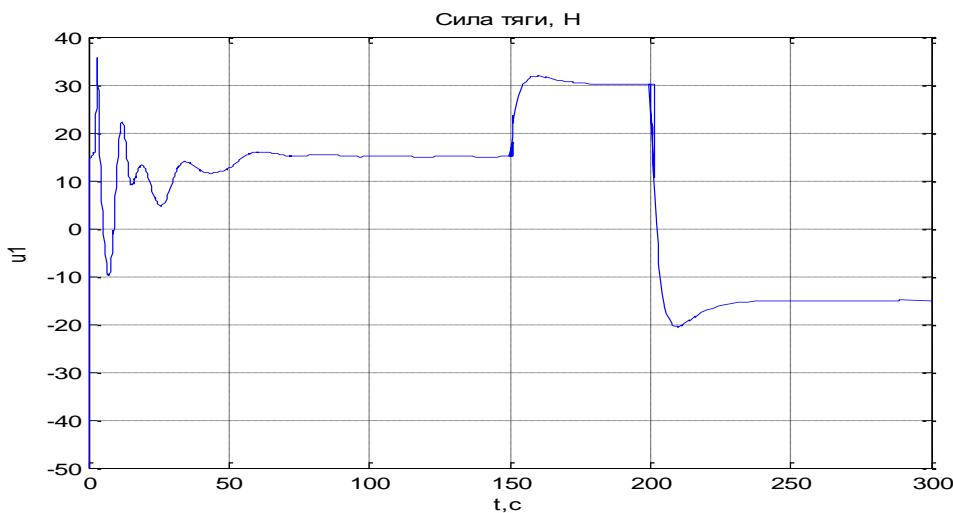


Рисунок 7 – График силы тяги

По результатам моделирования видно, что построенный наблюдатель верно оценивает меняющееся неизвестное возмущение, благодаря чему синтезированный регулятор компенсирует внешнее воздействие и отрабатывает выполнение поставленных целей. Важно отметить, что наблюдатель особо необходим, когда в модели есть параметрические возмущения или вовсе неизвестные коэффициенты модели.

Полученные результаты дают основание полагать, что проблема управления пространственным движением автономного подводного аппарата может быть успешно решена. Синергетический подход показал себя весьма эффективным инструментом при решении задач синтеза регуляторов для нелинейных, многосвязных динамических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селищев, А.А. Обзор по управлению автономными подводными аппаратами [Текст] / А.А. Селищев, С.В. Назаров, Д.А. Кожемякин // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Наука сегодня: опыт, традиции, инновации», 2016. – Вологда: Диспут 2016. – С. 49-50.
2. Евстигнеева, Л.В. Синтез алгоритма для одной задачи управления морскими подвижными объектами [Текст] / Л.В. Евстигнеева, Н.Н. Тарасов, М.Г. Тахтамышев // Проблемы управления. – 2007. – № 4. – С. 84-88.
3. Ивель, В.П. Адаптивная система вертикального позиционирования автономного подводного аппарата [Текст] / В.П. Ивель, Ю.В. Герасимова // Наука и мир. – 2014. – Т. 1. – №2(6). – С. 161–164.
4. Юхимец, Д.А. Синтез системы контурного управления для автономных подводных аппаратов [Текст] / Д.А. Юхимец, В.Ф. Филаретов // Экстремальная робототехника. – 2015. – №1(1). – С. 84-94.
5. Пшихопов, В.Х. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата [Текст] / В.Х. Пшихопов, Ю.В. Чернухин, А.А. Федотов [и др.] // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 87-101.
6. Hyakudome, T. Design of Autonomous Underwater Vehicle [Text] / T. Hyakudome // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2011. – Vol. 8. – No. 1. – Pp. 131-139.
7. Бочаров, Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития [Текст] / Л. Бочаров // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – № 7. – С. 62-69.
8. Бардачевский, Н.Н. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации [Текст] / Н.Н. Бардачевский, Е.Ю. Безсуднов // Сборник материалов международной научной конференции «СибОптика - 2013», 2013. – Новосибирск: СГГА. – Т.2. – С. 124-128.

9. Чернухин, Ю.В. Искусственный интеллект и нейрокомпьютеры [Текст] / Ю.В. Чернухин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. – 273 с.
10. Верис, В.Д. Разработка и исследование средств моделирования АНПА со встраиваемыми устройствами управления [Текст] / В.Д. Верис, О.В. Горемыкина, С.В. Смирнов // Сборник материалов международной научной конференции «Информатика и кибернетика», 2016. – СПб: ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет. – С. 78-81.
11. Колесников, А.А. Синергетическая теория управления [Текст] / А.А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
12. Синергетика: процессы самоорганизации и управления [Текст]: часть 2/ под общей редакцией А.А. Колесникова. – Таганрог: ТРТУ, 2005. – 358 с.
13. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. [Текст] / А.А. Колесников. – М: Едиториал УРСС / КомКнига, 2012. – 240 с.
14. Современная прикладная теория управления. Ч. II: синергетический подход в теории управления [Текст] / под ред. А.А. Колесникова. – М.: ФЦ «Интеграция», Таганрог: изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.
15. Лукомский, Ю.А. Системы управления морскими подвижными объектами [Текст] / ЮА. Лукомский, В.С. Чугунов. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.

II. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Афанасьева Ирина Викторовна

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук,
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ УПРАВЛЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИМИ ПЗС-СИСТЕМАМИ

Аннотация. ПЗС-системы предназначены для приема слабых изображений в оптической астрономии и являются основными инструментами для фотометрических и спектроскопических методов наблюдений. **Цель:** построение универсальной архитектурной модели высокопроизводительного и высоконадежного программного обеспечения для управления ПЗС-системой. **Задачи.** Создать методику разработки программ для ПЗС-систем на основе автоматного программирования. **Выводы.** Применение модели взаимодействующих автоматных объектов повышает эффективность астрономических наблюдений и позволяет значительно сократить сроки разработки программного обеспечения для широкого спектра ПЗС-систем.

Ключевые слова: система управления и сбора данных, автоматное программирование, ПЗС-система, архитектура, реагирующие системы.

Annotation. CCD systems are designed for acquisition of weak images in optical astronomy and are the main tools for photometric and spectroscopic methods of observation. **Purpose:** construction of a universal architectural model of high-performance and highly reliable software for controlling the CCD system. **Tasks:** Create a method for developing software for CCD-systems in line with the automata-based programming principles. **Conclusions:** The approach of interacting automata objects raises the effectiveness of astronomical observations and greatly reduced the software development life for a wide range of digital detector systems.

Keywords: Data Acquisition System, Automata-Based Programming, CCD system, Architecture, Reactive Systems.

Введение

В настоящее время системы цифровой регистрации изображений на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-системы) [1] применяются как в фундаментальной, так и в прикладной астрономии, в частности, для целей навигации и служб точного времени.

Типичная астрономическая ПЗС-система имеет в своем составе:

- охлаждаемую камеру со встроенным матричным ПЗС-фотоприемником изображения;
- контроллер, управляющий работой камеры;
- интерфейс передачи данных в удаленный компьютер.

Формат фотоприемника может существенно варьироваться: однокристальные матрицы имеют размеры от $2K \times 2K$ до $10K \times 10K$ пикселей, мозаичные – до $n \times (2K \times 4K)$ пикселей. В ходе наблюдений необходимо обеспечить прием, визуализацию, обработку и хранение информации для дальнейшего выявления физических, химических и других свойств астрономических объектов.

Основная проблема, присущая современным системам регистрации, связана с постоянным увеличением потока обрабатываемой информации (несколько Гбит/с и выше), поэтому задача гарантированного приема видеоданных является актуальной.

Требования к скорости, точности и надежности приема и обработки видеинформации в астрономии существенно выше по сравнению с системами технического зрения в промышленности и в быту, следовательно, для управления ПЗС-системой необходимо специальное программное

обеспечение (СПО). Возрастание сложности оборудования требует усовершенствования имеющихся подходов к разработке СПО.

Совершенствование высокопроизводительных ПЗС-приемников большого формата определяет новые критерии построения ПЗС-систем и специального программного обеспечения (СПО) для управления режимами приемника и сбора видеоданных. Эффективность светоприемной аппаратуры напрямую зависит от производительности программы управления.

Программа управления ПЗС-системой

Специальное программное обеспечение для ПЗС-системы должно обеспечивать проведение астрономических наблюдений, что включает в себя следующие функции:

- инициализацию контроллера;
- накопление и считывание данных в различных режимах;
- сохранение полученных изображений;
- визуализацию и анализ данных;
- настройку ПЗС-системы;
- автоматический мониторинг и постоянный вывод телеметрии.

Нефункциональные требования к программе управления:

- быстрая адаптация к новым ПСЗ-системам;
- эффективность и надежность в эксплуатации;
- гибкость и расширяемость;
- возможность повторного использования.

Модели описания поведения программных систем

Описывать поведение программных систем можно различными способами, которые условно можно классифицировать [2]:

- модели с явным выделением состояний;
- модели с потоками управления и данных;
- модели с последовательностями сообщений.

В моделях поведения с выделением состояний явно присутствуют управляющие состояния, а последовательность действий не показывается. В качестве графического языка используются диаграммы графа переходов состояний.

В моделях поведения с потоками управления явно присутствует описание последовательностей действий и типизированных переменных, а управляющие состояния скрыты. Графическим языком являются диаграммы графа деятельности.

В моделях поведения с последовательностью сообщений показываются последовательности действий, упорядоченные во времени. В качестве графического языка используются диаграммы взаимодействия.

Наряду с классификацией по внутренним свойствам моделей используются категории, основанные на свойствах классов описываемых поведений. В известной классификации Д. Харела [3] выделяются реагирующие системы, которые реагируют на изменения внешней среды, и трансформационные, которые преобразуют входные данные в выходные. Реагирующие системы часто являются постоянно действующими, а трансформационные системы, напротив, запускаются по мере надобности.

Программы управления ПЗС-системами относятся к классу параллельных (concurrent) реагирующих систем, поведение которых определяется с помощью моделей, основанных на переходах управляющих состояний. Данный подход лежит в основе автоматного программирования [4]. Программы предлагается строить как совокупность автоматизированных объектов управления, каждый из которых содержит систему управления (один или несколько взаимодействующих конечных автоматов) и объект управления.

Еще один способ описания поведения реагирующих программ предложен в работе [5]. Центральным понятием предлагаемой модели поведения является автоматный объект (рис. 1, а). В данном подходе источники событий, управляющие автоматы и объекты управления

рассматриваются как равноправные автоматные объекты, что является самым важным преимуществом предложенной модели по сравнению со всеми ранее предложенными моделями автоматного программирования [4].

В качестве графического языка используются диаграммы автомата UML [6], расширенные специальными стереотипами, портами и интерфейсами. Взаимодействие между автоматными объектами осуществляется через интерфейсы четырех возможных видов (рис. 1, б):

- события на переходах автомата являются предоставляемыми командами автомата, аргументы событий, если они есть, инициализируют локальные переменные автомата;
- сторожевые условия на переходах являются логическими выражениями над значениями, которые доставляют требуемые запросы к объекту управления;
- эффекты являются требуемыми командами объекта управления, в качестве аргументов могут передаваться значения локальных переменных автомата;
- автомат может предоставлять запросы о своем текущем состоянии и значениях других локальных переменных.

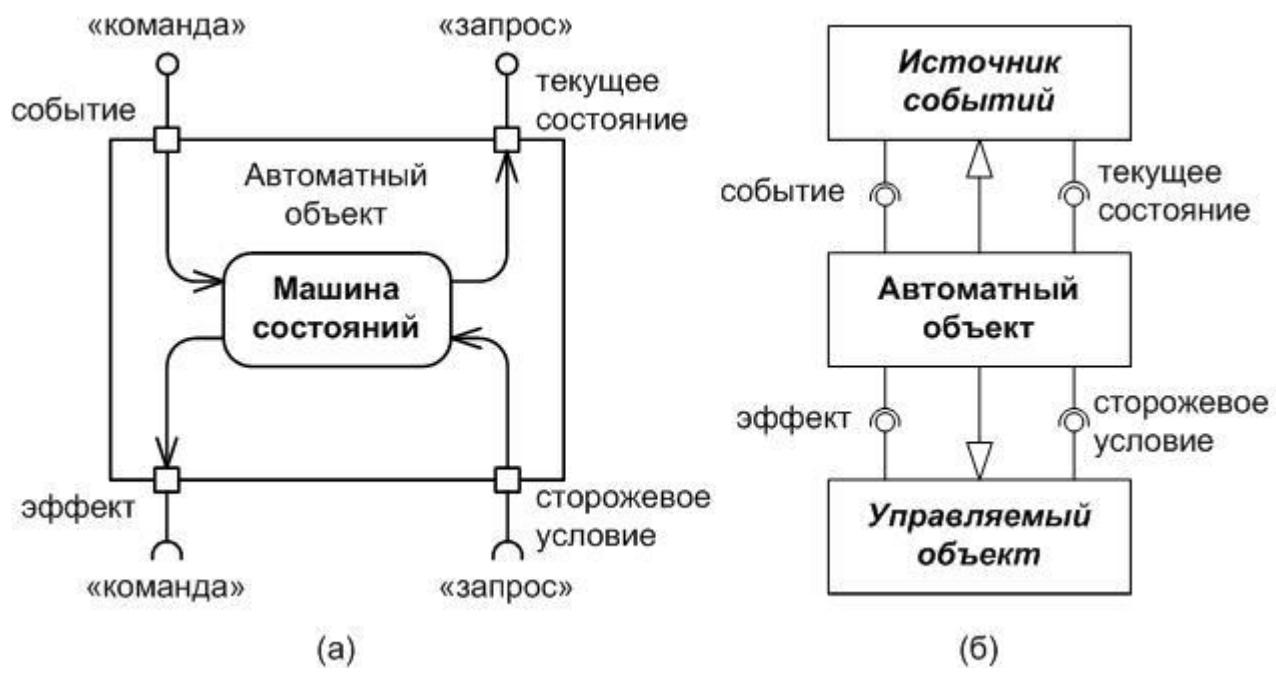


Рисунок 1 – Автоматный объект (а) и его связи (б)

В предлагаемой модели можно связывать автоматные объекты через соответствующие интерфейсы произвольным образом. Более того, данная автоматная модель естественным образом подразумевает асинхронность и параллельность. Совсем нетрудно получить привычную последовательную схему: достаточно вытянуть автоматы в линейку, связывая предоставляемые интерфейсы предыдущего с требуемыми интерфейсами последующего. Но если нет ограничений последовательного выполнения, то в предлагаемой модели можно строить естественные параллельные схемы, весьма эффективные на современных платформах.

Архитектурная модель программного обеспечения

Для реализации предлагаемой модели поведения используется графический язык ЧАО (CIAO, Cooperative Interaction of Automata Objects) [7]. Графический язык ЧАО является совместной комбинацией и расширением диаграммы автомата и диаграммы компонентов унифицированного языка моделирования UML [6].

Методика построения архитектуры параллельных реагирующих систем с помощью модели взаимодействующих автоматных объектов сводится к следующим шагам [8]:

- выделение автоматных объектов и построение алгоритмов управления;
- построение диаграммы связей автоматов;

- выделение компонентов;
- определение классов и интерфейсов.

В программе управления ПЗС-системой выделены следующие автоматные объекты:

- клиент;
- сервер;
- процесс наблюдений;
- плата ввода-вывода данных;
- чтение данных;
- обработка данных;
- сборка изображений.

Для каждого объекта построена диаграмма автомата, определены требуемые и предоставляемые интерфейсы. После группировки автоматов на диаграмме связей по функциональной нагрузке, с учетом выявленных связей между ними, получена многослойная архитектура программы управления (рис. 2).

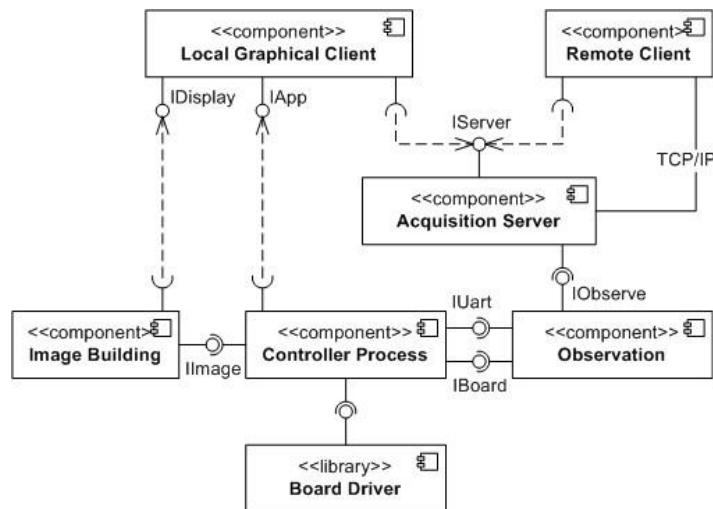


Рисунок 2 – Архитектура СПО для ПЗС-системы

Компоненты *Local Graphical Client*, *Remote Client* и *Acquisition Server* являются исполняемыми и реализуют клиент-серверный обмен командами и данными по интерфейсу *IServer*. Компонент *Observation* обеспечивает процесс наблюдений и предоставляет интерфейс *IObserve*, компонент *Controller Process* управляет платой ввода-вывода и реализует протокол управления камерой. Компонент *Image Building* отвечает за управление потоком данных, формирование и запись изображений и предоставляет интерфейс *IImage*. Визуализация данных происходит на стороне графического клиента посредством интерфейса *IDisplay*.

По построенной архитектурной модели создана программа, изоморфная модели и ставшая каркасом для программ управления новыми ПЗС-системами.

На основе модели взаимодействующих автоматных объектов разработана программа для управления ПЗС-системой нового поколения. Важным элементом СПО является реализация стандартного интерфейса передачи данных от цифровых камер в компьютер 10 GigE Vision, варианты которого предусматривают пропускную способность до 40 Гбит/с.

Выводы

Полученная архитектурная модель полностью соответствует требованиям, предъявляемым к программе управления ПЗС-системой:

- обеспечена нужная функциональность;
- протокол контроллера сконцентрирован в одном компоненте;
- надежная передача данных обеспечивается распараллеливанием задач по приему и обработке;

- внесение изменений не нарушает логики программы, так как вычисления полностью отделены;
- реализованные шаблоны компонентов и готовые компоненты можно повторно использовать в других системах.

Методика применена при переработке программ управления ПСЗ-камерой в составе спектрографа SCORPIO, и с июня 2016 г. в режиме постоянной эксплуатации на телескопе БТА продемонстрировала 0 отказов.

Использование методов автоматного программирования позволяет ускоренно создавать версии программного обеспечения для архитектур с различным числом контроллеров посредством наследования уже готовых автоматов. Результаты показывают, что применение данного подхода позволяет достичь более высоких показателей надёжности и производительности при проектировании архитектуры и при реализации реагирующих систем по сравнению с традиционными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурзин В.А., Маркелов С.В., Ардиланов В.И., Афанасьева И.В., Борисенко А.Н., Ивашенко Н.Г., Притыченко М.А., Митиани Г.Ш., Борисенко А.А., Вдовин В.Ф. Астрономические ПЗС-системы для 6-метрового телескопа БТА (обзор) // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 5. С. 500–506.
2. Bock C. Three Kinds of Behavior Models // Journal of Object-Oriented Programming. 1999. N 12 (4). P. 36–39.
3. Harel D. Statecharts: a Visual Formalism for Complex Systems // Science of Computer Programming. 1987. Vol. 8. P. 231–274.
4. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. – СПб.: Питер, 2011. – 176 с.
5. Atiskov A. Y. et al. Ontology-Based Analysis of Cryptography Standards and Possibilities of Their Harmonization / A. Y. Atiskov, F. A. Novikov, L. N. Fedorchenco, V. I. Vorobiev, N. A. Moldovyan // Theory and Practice of Cryptography Solutions for Secure Information Systems. – Hershey: IGI Global, 2013. – P. 1–33.
6. Новиков Ф. А., Иванов Д. Ю. Моделирование на UML. Теория, практика, видеокурс. – СПб.: Профессиональная литература, Наука и Техника, 2010. – 640 с.
7. Новиков Ф.А., Афанасьева И.В. Кооперативное взаимодействие автоматных объектов // Информационно-управляющие системы. 2016. № 6 (85). С. 50–64.
8. Афанасьева И.В., Новиков Ф.А. Архитектура программного обеспечения систем оптической регистрации // Информационно-управляющие системы. 2016. № 3 (82). С. 51–63.

Гумеров Айдар Ринатович

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук,

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РАДИОСПЕКТРОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ РАТАН-600

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы построения www-интерфейса для спектрально-поляризационного комплекса ССПК, эксплуатируемого на радиотелескопе РАТАН-600 и активно используемом в исследованиях различных физических процессов, протекающих на Солнце. Представлен материал и проведён обзор используемых технологий необходимый для успешного решения задачи разработки www-интерфейса. Приведен обзор и обоснование выбора используемой технологии. Представлены результаты разработки и испытаний www-интерфейса.

Ключевые слова: Солнце, радиоконтинуум, методы, солнечная активность, интерфейс.

Annotation. In this paper, we consider the construction of a www interface for the spectral-polarization complex of the SSPK operated on the radio telescope RATAN-600 and actively used in studies of various physical processes taking place on the Sun. The material is presented and the review of used technologies necessary for the successful decision of a problem of development of www the interface is spent. The review and justification of the choice of the technology used are presented. The results of development and testing of the www interface are presented.

Keywords: Sun, radio continuum, method, solar activity, web- interface.

Введение

В Санкт-Петербургском филиале Специальной астрономической обсерватории была поставлена задача разработки приложения для улучшения взаимодействия пользователя с солнечным спектрально-поляризационным комплексом РАТАН-600 [1]. В данной работе рассматриваются проблемы представления наблюдательных данных спектрально-поляризационного солнечного комплекса РАТАН-600 с большим динамическим диапазоном - ССПК. РАТАН-600 - крупнейший в мире радиотелескоп с рефлекторным отражателем диаметром 600 метров. Радиотелескоп расположен в Карачаево-Черкесии на высоте 970 метров над уровнем моря и используется в научно-исследовательских программах Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук. Солнечные наблюдения ведутся в южной части телескопа, которая построена на антенной системе Юг+Перископ (Рисунок 1).

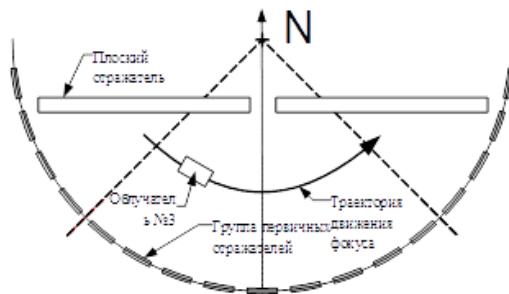


Рисунок 1 – Схема антенной системы Юг + Перископ.

Система Юг + Перископ состоит из 225 первичных отражателей, плоского и кругового отражателя, облучателя №3, который представляет собой несимметричный параболический цилиндр, в фокусе которого находится первичный облучатель. В этом режиме круговой отражатель образует параболический цилиндр с вертикальной образующей, который направлен на горизонт. Плоский отражатель устанавливается на высоту источника. При этом формируемая диаграмма направленности антенны позволяет учесть все особенности антенной системы РАТАН-600 и в перспективе спрогнозировать параметры системы в новых режимах наблюдений [2].

Посредством системы сбора ССПК, установленной на Облучателе 3, производится запись наблюдений в цифровом формате. Система построена на базе ОС Linux. Записи наблюдений посредством специализированного программного обеспечения преобразуются в требуемый формат и передаются на сервер базы данных. Управление комплексом возможно либо с локального компьютера с помощью Qt — приложения, либо через систему расписания наблюдений, с использованием в качестве интерфейса пользователя набора текстовых команд. Для расширения возможностей системы ССПК в части представления данных и возможности удалённого управления системой была проведена разработка www-интерфейса, обеспечивающего доступ любому авторизованному пользователю к удалённому управлению и наблюдению за текущими результатами измерений с помощью браузера.

В 2016г. в антенной системе Южного сектора с Перископом на РАТАН-600 установлена и введена в эксплуатацию новая версия широкодиапазонного спектрально-поляризационного комплекса для солнечных наблюдений - ССПК. Основные свойства этой системы:

- Возможность динамической подстройки коэффициентов подавления сигнала в измерительных каналах системы и, как следствие, было получено резкое увеличение динамического диапазона (от регистрации сигналов на уровне предельной чувствительности около 0.1 К до регистрации мощных событий соответствующих $1-2 \times 10^6$ К).
- Реализованы два уровня частотного анализа (в полосе 3-18 ГГц): 10% уровень (10 частотных каналов по 1500 МГц) и 1% уровень (80 частотных каналов с полосой 100 МГц).
- Обеспечена возможность использования режима работы total power. Для решения этой задачи была создана и включена в состав комплекса система высокоточной стабилизации температуры (до уровня 0.1 град.) модулей радиометра с применением элементов Пельтье.
- Обеспечена возможность работы в нескольких режимах работы радиометрического комплекса и их оперативного переключения. Для обеспечения динамического переключения режимов работы комплекса был создан управляемый генератор синхросигналов радиометра на базе контроллера Arduino.
 - Разработана система сбора радиометрических данных с применением модулей сбора отечественной фирмы L-card и разработано программное обеспечение для управления модулями радиометра.
 - Процесс наблюдений полностью автоматизирован. Реализован удалённый доступ к управлению параметрами комплекса и передача данных на сервера СПб Ф САО РАН.

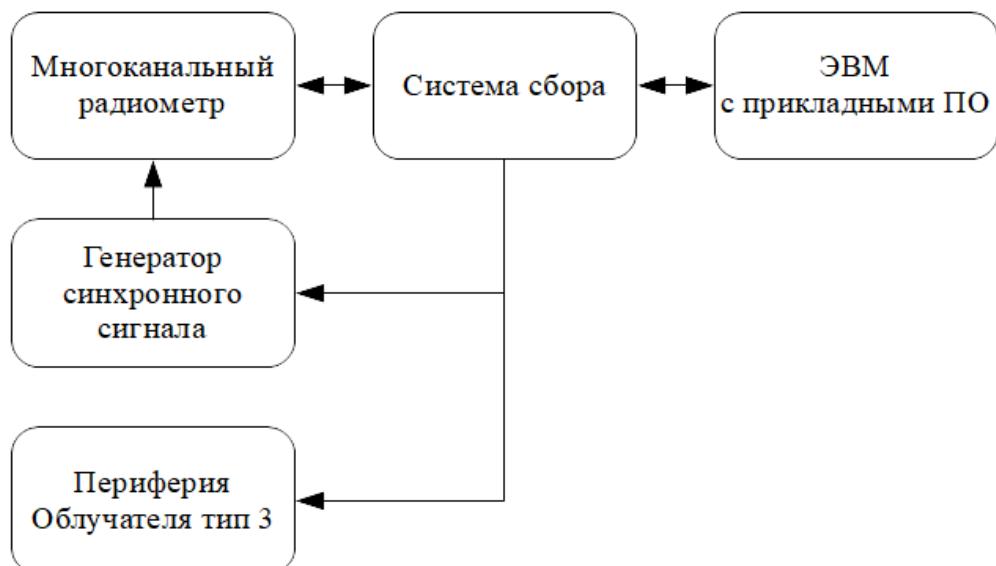


Рисунок 2 – Структурная схема комплекса технических средств многоканального радиометрического комплекса.

Комплекс ССПК состоит из следующих основных структурных элементов:

- многоканальный радиометр, обеспечивающий прием СВЧ сигнала и решение задачи выделения множества полос частоты в измеряемом сигнале, в диапазоне 3-18ГГц;
- система сбора, обеспечивает многоканальное АЦП преобразование сигналов с выхода радиометра, суммарное количество каналов системы - 90;
- управляемый генератор синхронного сигнала, обеспечивает формирование меандра заданной частоты на нескольких выходах устройства и управление этими выходами согласно управляющих сигналов от системы сбора;
- периферия облучателя типа 3 — входы релейной схемы управления колпаком облучателя; ЭВМ с прикладным ПО, компьютер под управлением ОС Linux, на котором выполняется комплекс специально разработанных управляющих и прикладных программ.

ЭВМ сбора и предварительной обработки построена на базе системы Linux. Проблема управления комплексом оборудования подсистемы сбора ССПК решается посредством набора прикладных программ и набора системных утилит (Рисунок 3).

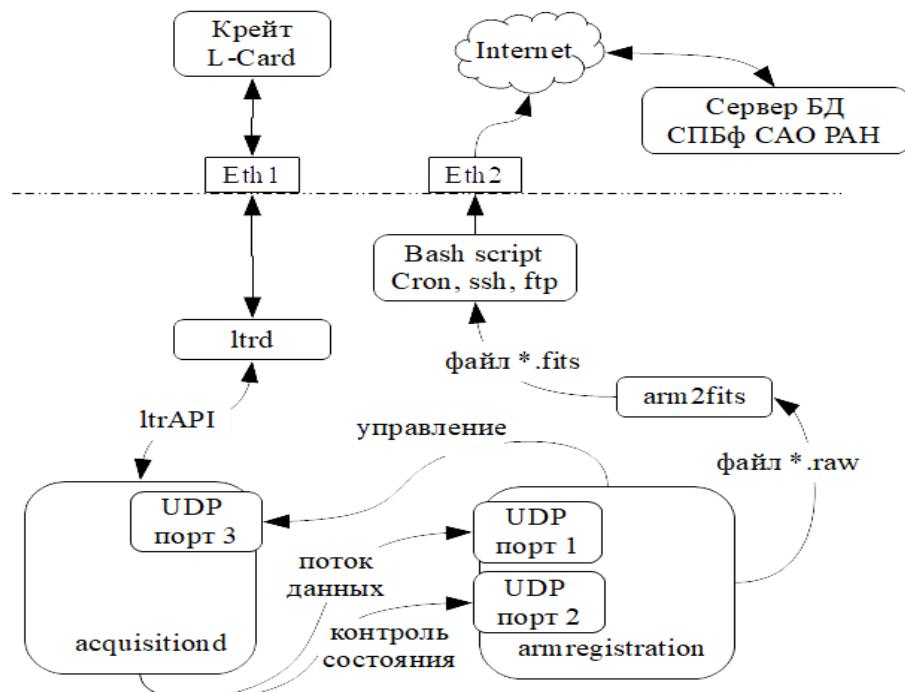


Рисунок 3 – Схема взаимодействия прикладных программ и системных утилит для управления ССПК.

Низкоуровневые задачи управления и инициализации оборудования крейта LTR EU16 выполняются утилитой ltrd, поставляемой фирмой L-Card. Поток данных получаемый через интерфейс Eth1 и утилиту ltrd доступен в программе пользователя посредством программного интерфейса ltrApi. Далее, в многопотковом приложении acquisitiond обеспечиваются следующие операции:

- предварительная математическая обработка измеряемой информации;
- упаковка информации в протокол обмен данными программы armregistration.

Программа armregistration обеспечивает:

- ведение наблюдений в соответствии с файлом расписаний;
- отправку команд в подсистему нижнего уровня через унифицированный протокол управления armregistration;
- накопление измеренных данных за сеанс наблюдения и формирование raw файла наблюдений;
- запуск скриптов пост-обработки файла наблюдений.

Далее результаты измерений конвертируются набором скриптов из raw-файла в стандартизированный файл хранения изображений в формате fits посредством утилиты arm2fits и затем результаты измерений копируются на удаленный сервер БД.

Для решения задачи создания www-интерфейса используется комплекс программных средств (Рисунок 4).

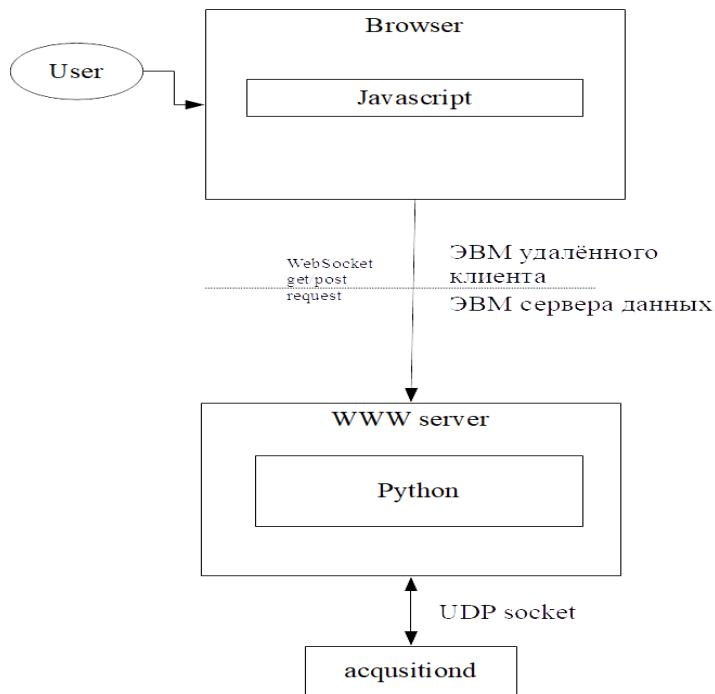


Рисунок 4 – Структурная схема разрабатываемого web-приложения.

Он состоит из следующего набора программного обеспечения:

- браузер поддерживающий JavaScript
- www сервер с поддержкой Python — сервер, обрабатывающий запросы python приложения и возвращаемый требуемый результат;
- JavaScript приложение — приложение, которое обрабатывает события, возникающие при взаимодействии пользователя с браузером;
- Python приложение — приложение, которое посылает запросы на www-сервер;

Функцию удалённого клиента выполняет браузер, web страница и JavaScript приложение, исполняемое браузером на стороне клиента. С помощью этих компонент создаётся визуальный интерфейс пользователя. В частности, JavaScript приложение решает задачу получения данных от пользователя и их передачу на сервер. Сервер с помощью Python приложения интерпретирует данные полученные от JavaScript и взаимодействует с программой acquisitiond.

Алгоритм web интерфейса выполняет следующие основные функции:

- авторизации/регистрации пользователя;
- предоставление страницы управления радиометрическим комплексом РАТАН-600;
- обработка событий интерфейса пользователя на странице управления, интерпретация событий и формирование HTTP запросов к python серверу;
- формирование откликов на запрос или реакций программного обеспечения с использованием REST API и возврат статус код ответа.

Для взаимодействия пользователя с радиометрическим комплексом РАТАН-600 была разработана клиентская часть приложения с использованием средств HTML/CSS и JavaScript - клиентское ПО. Это приложение состоит из двух страниц: страницы авторизации и страницы с элементами управления (Рисунок).

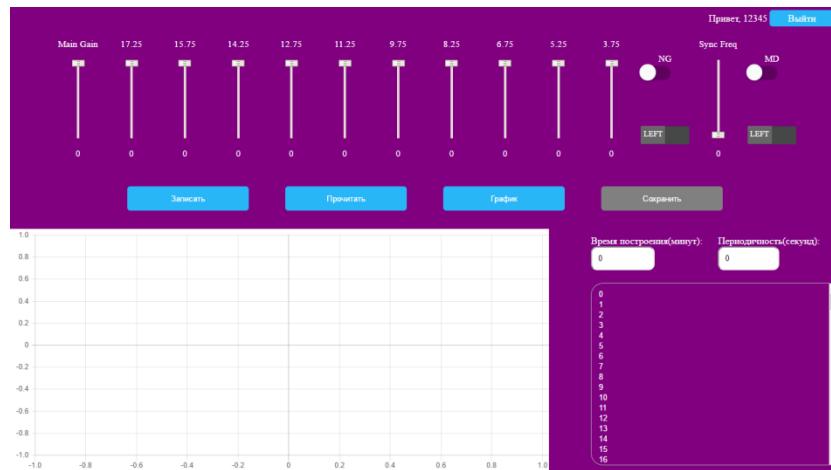


Рисунок 5. Структурная схема разрабатываемого web-приложения.

Страница авторизации содержит, следующие интерактивные элементы:

- кнопки - «Войти», «Регистрация»
- поля ввода логина и пароля

Страница управления содержит следующие интерактивные элементы:

- кнопки - «Прочитать», «Записать», «График», «Сохранить»;
- ползунки — интерактивные элементы страницы для выбора значения аттенюаторов;
- переключатели — интерактивные элементы страницы для управления значениями управляющих сигналов системы;

• поле для ввода числа — интерактивный элемент для ввода длительности построения графика;

- canvas — объект для представления радиометрического сигнала в виде временных трендов;
- интерактивная таблица — таблица, позволяющая выбрать канал для визуализации;

Для каждого из этих элементов был написан обработчик события на языке javascript. Ниже представлена полная схема обработки событий с помощью клиентского приложения (Рисунок).

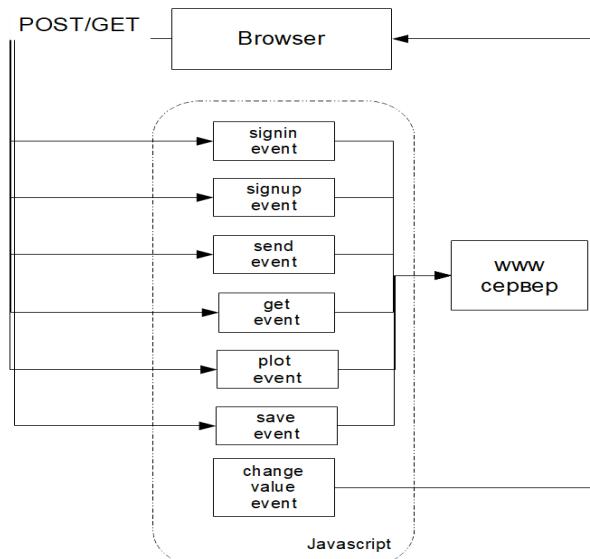


Рисунок 6. Структурная схема клиентской части приложения.

Обработчик каждого из этих событий представляет собой js функцию, которая вызывается при совершении определённого события. В приложении обрабатываются следующие события:

- signin event – событие, срабатываемое при нажатии пользователем на кнопку «Войти». При этом со стороны клиента отправляется POST запрос с введённым логином и паролем на python сервер с адресом /signin. Ответ — статус запроса в формате JSON;

- signup event — событие, срабатываемое при нажатии пользователем на кнопку «Регистрация». При этом со стороны клиента отправляется POST запрос с введённым логином и паролем на python сервер с адресом /signup. Ответ — статус запроса в формате JSON.

- send event — событие, срабатываемое при нажатии пользователем на кнопку «Записать». При этом со стороны клиента отправляется POST запрос на адрес /send со значениями элементов управления управляющими сигналами системы. Ответ — статус запроса в формате JSON;

- get event — событие, возникающее при нажатии пользователем на кнопку «Прочитать». При этом на стороне клиента отправляется GET запрос на адрес /get без параметров. Ответом на запрос приходят статус запроса и данные в формате JSON в случае успешно выполненного запроса;

- plot event — событие, возникающее при нажатии пользователем на кнопку «График». При этом на стороне клиента отправляется POST запрос на адрес /graph с периодичностью и продолжительностью, заданной пользователем. Ответ — статус запроса и данные, в случае успешного выполнения в формате JSON;

- save event — событие, возникающее при нажатии пользователем на кнопку «Сохранить». При этом на стороне клиента отправляется POST запрос с данными, полученными из графика, на адрес /save. Ответом на данный запрос приходит статус выполненного запроса;

- change value event — событие, возникающее при изменении значения элементов управления управляющими сигналами системы (ползунки, переключатели) и изменяющие текст элемента, привязанного к определённому элементу управления.

Для полноценной работы приложения сервер должен принять данные с приложения acquisitiond в виде UDP пакета. На рисунке ниже представлена схема взаимодействия приложения acquisitiond с сервером python

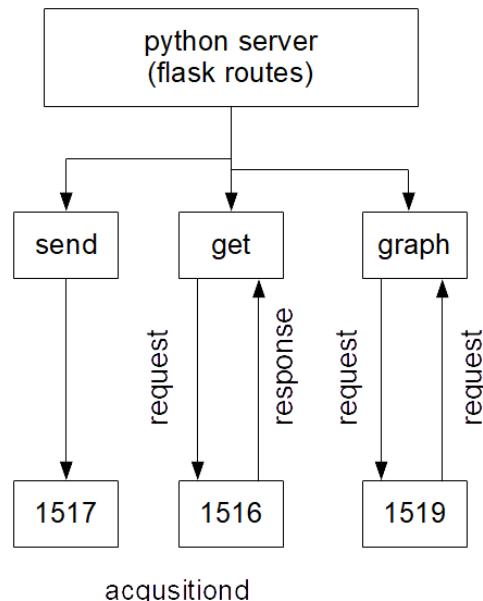


Рисунок 7. Схема взаимодействия python сервера с приложением acquisitiond.

Далее происходит обработка полученного пакета с помощью REST API приложения, разработанного на flask. Схема работы python сервера приведена на рисунке ниже.

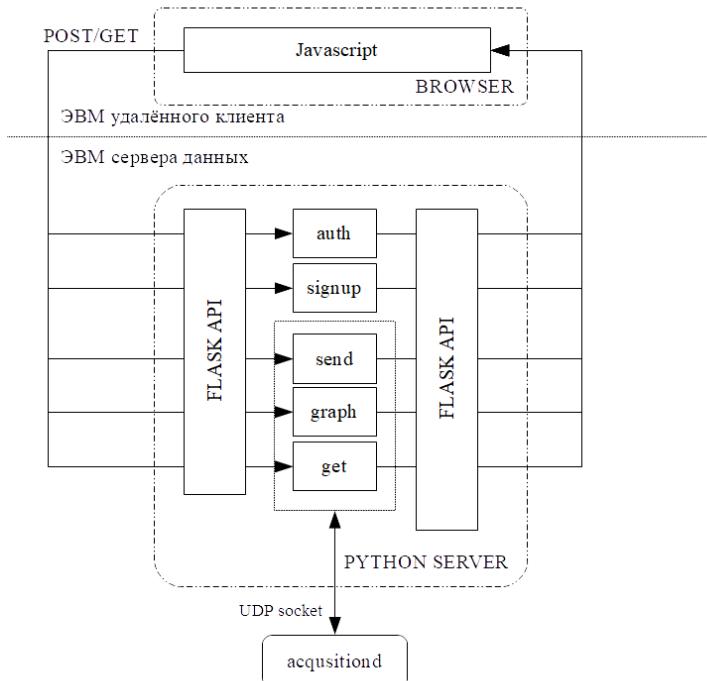


Рисунок 8. Структурная схема серверной части приложения.

Данная часть приложения представляет собой набор адресов, построенных на архитектуре REST, которые взаимодействуют с клиентской частью приложения и предоставляют необходимые данные по разработанному api. В таблице ниже приведен список запросов к flask rest api приложению.

Таблица 1 – Запросы к REST API приложению.

URL	METHOD	POST body	Результат
/signup	POST	JSON	Регистрация нового пользователя
/signin	POST	JSON	Авторизация пользователя
/logout	GET	Empty	Очистка сессии текущего пользователя
/get	GET	Empty	Возврат значения обработанных байтов с управляющих сигналов системы
/send	POST	JSON	Получает от клиента значения управляющих сигналов системы, обрабатывает их и отправляет на UDP сервер
/graph	GET	Empty	Получение частот каждого из 180 каналов с сервера РАТАН-600 для их визуализации
/save	POST	JSON	Получение значений из графика и запись их в текстовый файл

12 июня 2017 года с 12:08 до 12:20 была произведена пробная запись наблюдений солнца. Результаты записи наблюдений приведены на рисунке ниже.

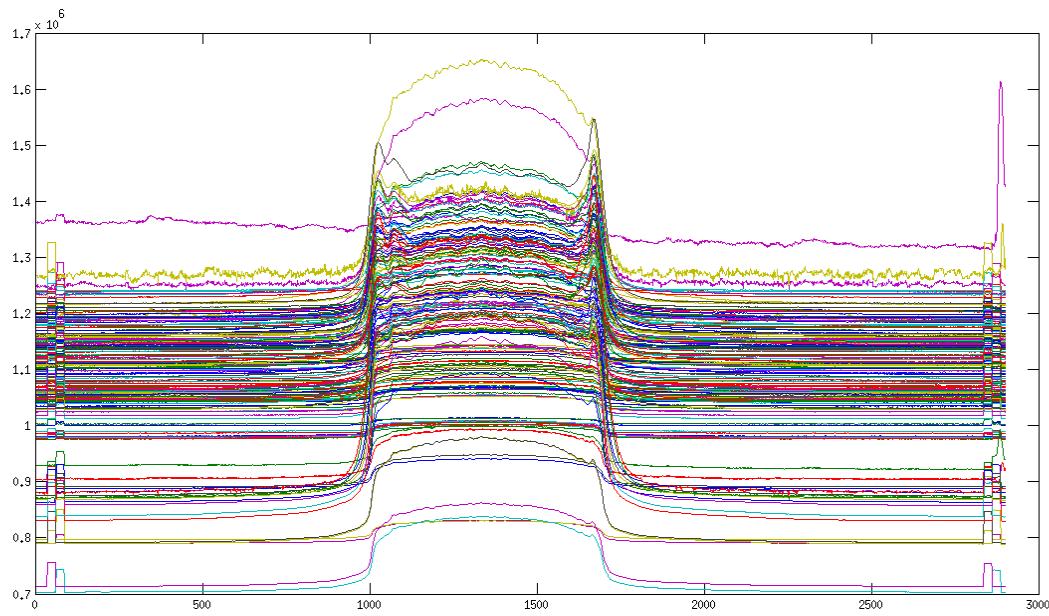


Рисунок 9. Результаты солнечных наблюдений 12 июня 2017 года с 12:08-12:20.

Также проводилось наблюдение с помощью web-приложения со следующими параметрами:

- Периодичность — 1с;
- Длительность — 8 минут;
- Каналы — 2, 3

Результаты наблюдений представлены на рисунке ниже:



Рисунок 10 – Результаты наблюдения с помощью разработанного web-приложения.

Разработанный программный комплекс по сравнению с другими решениями несёт в себе следующие преимущества:

- отсутствие необходимости установки клиентского приложения на локальный компьютер;
- кроссплатформенность;

- отсутствие необходимости повторной компиляции приложения при переходе на другую ОС.
- Клиент-серверная REST архитектура применение которой позволяет организовать параллельную работу пользователей с ССПК минимальными затратами на разработку ПО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парицкий Ю.Н., Наука и человечество, 1989: Международный ежегодник. - М.: Знание, с. 266-279.
2. Tokhchukova S.Kh., Korzhavin A.N., Bogod V.M.,et al., Astrophysical Bulletin, 2014, **69**, Issue 3, pp.356-367.

*Желенкова Ольга Петровна (1,2), Витковский Владимир Валентинович (1,2),
Пляскина Татьяна Анатольевна (1), Малькова Галина Александровна (1),
Шуиура А.А. (1), Шергин Владимир Сергеевич (1), Черненков Владимир Николаевич (1)*

1. Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук
2. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ В КОНТЕКСТЕ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

***Аннотация.** В САО РАН имеется архивная система, в которой хранятся разнородные цифровые коллекции наблюдений, полученных на разных инструментах обсерватории, начиная с 1994 года. За столь длительный срок архив претерпел существенные изменения в форматах данных, методах обработки и хранения данных. Не вызывает сомнения необходимость долгосрочного хранения астрономических данных. Для обеспечения долговременной сохранности данных требуется своевременная миграция цифровых файлов на современные цифровые носители.*

***Annotation.** The SAO RAS has the archive facility, which contains heterogeneous digital collections with the observations, obtained on the different instruments of SAO RAS since 1994. Within so long term of existence the archive underwent substantial changes in the data formats, methods of data processing and storage. There is no doubt in the need for long-term keeping of astronomical data. A timely migration of digital files on the modern carriers is required to ensure long-term storage of data.*

Введение

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН) обладает двумя крупнейшими телескопами России. Наблюдения на этих инструментах ведутся не только учеными из астрономических институтов и ведущих ВУЗов нашей страны, но и зарубежными исследователями. С 80-х годов прошлого века регистрация данных, получаемых в процессе наблюдений, стала производиться в основном в цифровом виде. К этому же времени относится и разработка концепции банка астрономических данных (БАД) обсерватории [1], который должен был объединить наблюдательные данные, астрономические каталоги, цифровые обзоры, технические документы, статьи. Инструменты обсерватории являются инструментами коллективного пользования, что предполагает интенсивный обмен получаемой на телескопах информации. Реализация веб-доступа к разнородным электронным коллекциям и объединение информационных ресурсов обсерватории - это задачи интегрированного банка данных (ИБД), который развивает концепцию БАД с учетом современных тенденций в информационных и компьютерных технологиях. В этом контексте общий архив наблюдений является частью ИБД САО РАН.

За время своего существования архив прошел несколько этапов модернизации [1-4], обусловленных изменениями как требований к набору сервисных функций, так и методами представления информации, а также способов хранения данных, которые определяются разными цифровыми носителями (от магнитных бобинных лент, дат-кассет, стримерных лент к оптическим дискам и RAID-массивам). Эти этапы связаны как с развитием компьютерных технологий, так и изменениями методов наблюдений. Учитывая полученный опыт работы с цифровыми коллекциями, на текущий момент архитектура архивной системы включает в себя каскадную систему архивизации для накопления файлов, хранилище и информационно-поисковую систему (ИПС).

На сегодняшний момент общий архив наблюдений САО РАН – едва ли ни единственный в нашей стране астрономический архив с оперативным веб-доступом к данным. Архивная система обеспечивает долговременное надежное хранение наблюдений и пополнение цифровых коллекций. Добавление новых цифровых коллекций также предполагалось при разработке ИПС архива. Далее мы описываем принципы организации архивной системы и реализацию веб-доступа к коллекции радионаблюдений, а также этапы реинжиниринга данных для их миграции в новую среду хранения.

Эта коллекция включает около 0.5 миллиона файлов с наблюдениями в радиодиапазоне, полученными на радиотелескопе РАТАН-600 в интервале 1993-2014 гг.

1. Принципы организации и архитектура архивной системы

На телескопах обсерватории постоянно ведется разработка приборов и внедрение новых методов наблюдений. Каждый метод наблюдения связан с определенным компьютерно-аппаратным комплексом - системой сбора, которая обеспечивает регистрацию данных с прибора, установленного на телескопе. Каждый файл кроме цифровых данных обязательно содержит набор параметров, которые однозначно описывают наблюдение, метеоусловия, объект наблюдений и др., что важно для дальнейшей обработки и получения научного результата. Источниками значений этих параметров являются система управления телескопом, система сбора и сам наблюдатель. Часть параметров поступает в заголовок файла автоматически, часть заносится наблюдателем.

Формат цифровых данных, регистрируемых системой сбора, обычно разрабатывается группой, которая реализует эту систему. Представление информации, особенно в части описания параметров наблюдений, в разных системах сбора – разное. Для описания наблюдения разные системы сбора используют от десятков до нескольких сотен параметров. Системы сбора модернизируются, что часто приводит к изменению этих параметров, поэтому каждый архив включает в себя не одну версию форматов. Таким образом, в архиве хранятся разнородные по представлению данных цифровые коллекции. Каждая коллекция называется локальным архивом и включает в себя данные, полученные с помощью одного метода наблюдений. Общий архив наблюдений – это коллекция локальных архивов.

Архивная система состоит из трех взаимосвязанных подсистем -каскадной системы архивизации, хранилища и информационно-поисковой системы.

Следующие принципы определяют правила работы с файлами, которые помещаются в общий архив наблюдений:

- формат наблюдательного файла не меняется;
- в архиве хранятся необработанные наблюдения, в том виде, в каком они были получены на телескопе;
- физическая единица хранения - оптический диск;
- оптический диск имеет следующую структуру – метка диска и каталоги с файлами, где в каждом каталоге хранятся наблюдения, полученные за одну дату, имя каталога содержит дату наблюдения;
- логическая единица хранения – наблюдение;
- заявители наблюдательной программы согласно положению об архиве наблюдательных данных САО РАН имеют право на двухлетний период исключительного доступа к данным, затем данные открываются для свободного доступа.

1.1. Каскадная система архивизации

Наблюдательные данные, полученные на инструментах обсерватории, хранятся на оптических дисках. Чтобы обеспечить запись данных на оптический диск, информация, полученная в течение серии наблюдений (или сеты), накапливается на компьютере системы сбора – это первый уровень системы архивизации.

По завершении сеты информация копируется на выделенный файл-сервер, который является вторым уровнем архивизации, в каталог, соответствующий методу наблюдений. Когда данных накапливается достаточно по объему, администратор формирует образ диска, а затем записывает его на оптический диск, который входит в третий уровень системы архивизации – постоянное off-line хранилище. На диск записываются наблюдательные данные, а именно: файлы с наблюдениями объектов, сервисные файлы, используемые для коррекции инструментальных ошибок и привязок, журналы наблюдений, сопутствующая информация, подготовленная наблюдателем, а также дополнительная информация – текстовые справочные файлы, информация, используемая для идентификации диска.

1.2. Хранилище

Хранилище общего архива наблюдений физически имеет два уровня, чтобы с одной стороны обеспечить долговременное надежное хранение информации, а с другой стороны – оперативный доступ к файлам.

Первый уровень - «глубокое» хранилище, которое включает оптические диски и их дубликаты. Доступ к этой информации возможен только в off-line режиме и реализуется администратором. Диски имеют сквозную нумерацию. Номер присваивается диску по мере формирования. Архивный диск включает метку тома (файл нулевой длины) и каталоги с наблюдениями (иногда имеются вложенные каталоги), причем данные одной наблюдательной ночи записываются в один каталог, и название каталога содержит дату наблюдения.

Второй уровень - оперативное хранилище, организованное на дисковом RAID-массиве. В него скопированы все оптические диски из off-line хранилища, а также сюда записаны эти же диски, но уже обработанные программами-фильтрами согласно правилам, описанным далее, чтобы обеспечить работу информационно-поисковой системы с имеющейся информацией. Эта часть оперативного хранилища имеет логическую организацию согласно поддерживаемым цифровым коллекциям – локальным архивам и оптическим дискам, помещенным в ИПС.

Перед тем, как поместить CD/DVD-диск в ИПС, он копируется в оперативное хранилище, а затем проводится процедура верификации, которая проверяет:

- количество локальных архивов, записанных на диске;
- содержит ли имя каталога имя каталога с данными одной ночи дату наблюдений;
- соблюдается ли хранение данных одной ночи в одном каталоге;
- выполняется ли правило записи наблюдения в один файл.

Затем диск проверяется на соответствие принятым в архивной системе правилам. При несоответствии выполняются следующие преобразования:

- при наличии нескольких локальных архивов CD-диск обрабатывается несколько раз;
- наблюдения одной ночи переписываются в один каталог, если это не соблюдено;
- каталоги переименовываются таким образом, чтобы название содержало дату наблюдения (при несоблюдении);
- извлекаются файлы из tar-архивов;
- производится повторная компрессия при отличии метода компрессии от bzip2;
- файлы, хранящиеся во внутреннем формате системы MIDAS, преобразовываются в файлы FITS-формата[5];
- анализируются FITS-заголовки, и, если название инструмента отличается от того, к которому относится диск, то изменяется принадлежность файла к локальному архиву.

На текущий момент объем данных в общем архиве обсерватории составляет около 1.5 ТБ (без компрессии). Происходит пополнение 5 локальных архивов, остальные коллекции хранят данные, которые получены на приборах, выведенных из использования. Еще архивная система включает 3 локальных архива с прямыми снимками, для которых выполнена координатная калибровка.

1.3. Информационно-поисковая система

Разработка и реализация информационно-поисковой системы (ИПС) общего архива наблюдений САО РАН проводилась поэтапно. Сначала был разработан прототип [1] на СУБД Oracle для небольшого архива радионаблюдений. В запросах использовались весь набор параметров из заголовков файлов. При применении этой разработки к другим коллекциям выяснилось, что в некоторых локальных архивах набор параметров очень ограничен, особенно в самых ранних данных. Тогда мы сократили набор параметром до минимума, но чтобы запросы можно было произвести ко всем коллекциям. Это было реализовано в первой рабочей версии ИПС, где выполнялись запросы по дате наблюдений и выбранному локальному архиву, можно было копировать данные по http-протоколу, просматривать заголовки и содержимое файлов. Реализована

эта версия была также на СУБД Oracle; веб-интерфейс поддерживался спецификациями CGI, DBD и DBI.

В следующей версии ИПС [2] был расширен набор сервисов, чтобы обеспечивать наиболее часто используемые запросы к архиву - по дате наблюдения, прибору, типам файлов, координатам наблюдаемого поля/объекта, имени астрономического объекта, программе наблюдений, заявителю программы и наблюдателям, принимавшим участие в наблюдениях. Этот релиз уже был построен на СУБД PostgreSQL, веб-интерфейс реализован с помощью Perl-скриптов.

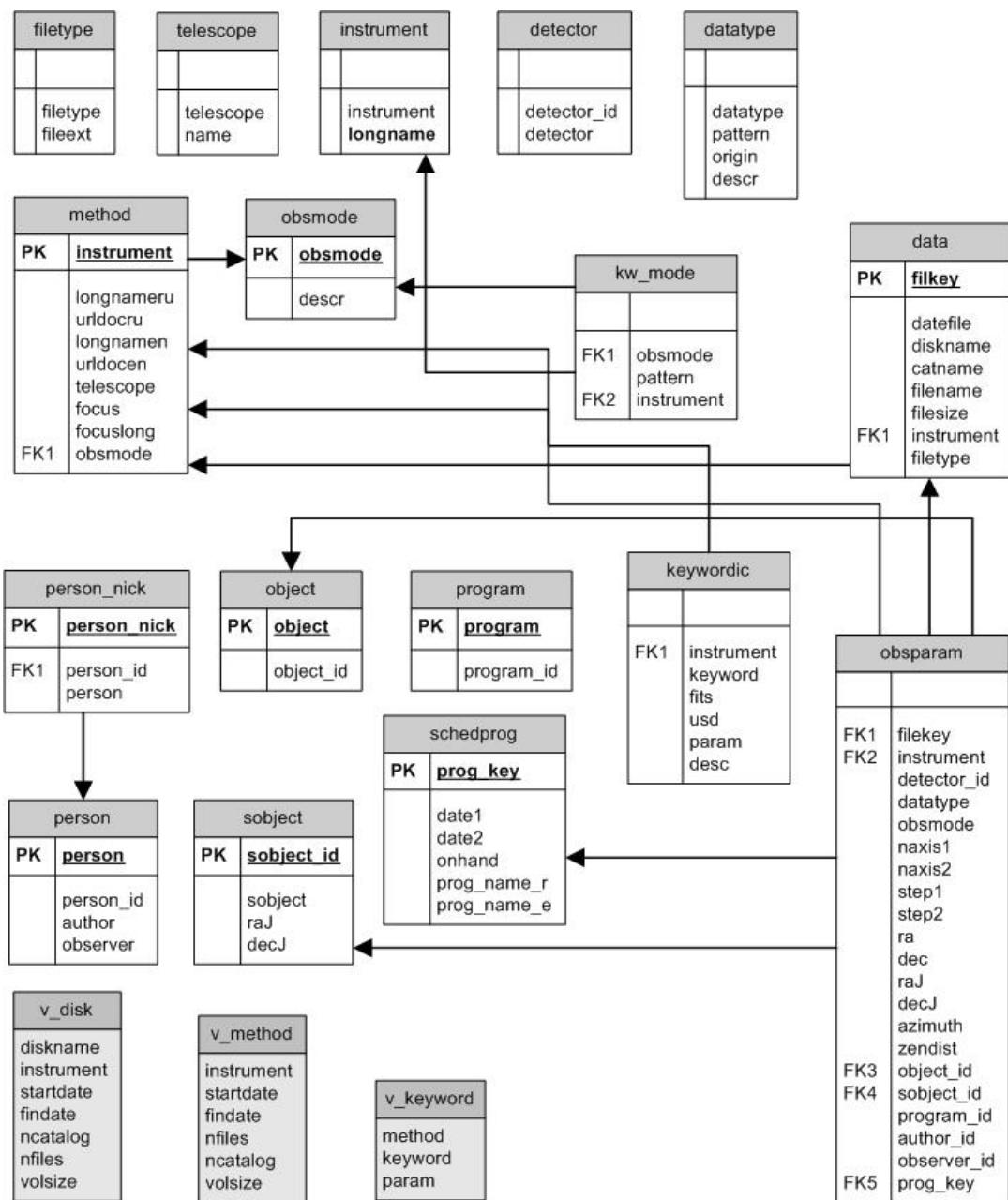


Рисунок 1 – Схема таблиц информационно-поисковой системы общего архива наблюдений.

На следующем этапе модернизации ИПС была изменена схема таблиц (рис. 1): были добавлены представления и ограничения целостности, обеспечивающие непротиворечивость данных [7].

Таблицы ИПС можно разбить на три группы по частоте обновления и способу занесения новых данных:

1. справочные таблицы, которые наполняются при создании схемы базы данных. Новые записи заносятся только при добавлении нового локального архива;

2. справочные таблицы, которые пополняются при внесении в ИПС нового CD/DVD-диска. Записи вносятся в таблицу при программном анализе заголовков файлов. В некоторых случаях они могут быть скорректированы администратором после обнаружения противоречий или ошибок после проверки логов, где регистрируется процесс анализа диска;

3. таблицы с данными о каждом архивированном файле. Записи добавляются при внесении нового CD/DVD-носителя, при заполнении полей этих записей используются таблицы первых двух групп.

При загрузке нового диска в ИПС таблицы заполняются параметрами, необходимыми для стандартных запросов. Однако существуют определенные трудности из-за того, что:

- после модернизации систем сбора и приборов могут изменяться форматы данных, что приводит к тому, что в локальном архиве хранится несколько версий заголовков файлов, отличающихся набором ключевых слов и форматом записи величин;
- в разных локальных архивах в заголовке файла могут быть разные по названию ключевые слова (поскольку файлы формируются разными системами сбора), но обозначающие одну и ту же физическую величину.

Поэтому при выполнении синтаксического разбора заголовка файла и извлечении значений параметров используется специальная таблица keywordic в схеме базы данных, в которой связываются названия ключевых слов и атрибуты ИПС. В эту таблицу включены все ключевые слова из локальных архивов, которые обнаружены при разборе заголовков FITS-файлов, а также их семантические значения, определяющие физический смысл величины и стандартное описание величины, так называемый Unified Content Descriptor (UCD)[6].

Разработан программный инструмент автоматической координатной привязки прямых снимков, который позволяет реализовывать точность координатной привязки кадров до 0.2''. Программа проверяет ключевые слова в FITS-заголовках и, где возможно, корректирует ошибки. Результат работы записывается в новый файл с FITS-заголовком, который может использоваться в качестве стандарта для прямых снимков БТА. Он соответствует FITS-стандарту версии 3.0 и включает набор WCS-параметров. Файл при этом распознается подавляющим большинством астрономических приложений.

Расширена область постоянного хранения общего архива – добавлена область для накопления обработанных данных, куда добавлены 3 новых локальных архива с координатной привязкой. Вместо FITS-заголовка, подготавливаемого системой сбора, файл записывается в область хранения с новым FITS-заголовком, где произведена проверка значений ключевых слов на корректность значений и их синтаксис, а для прямых снимков добавляется еще набор WCS-параметров, полученный в результате астрометрической калибровки.

Разработана новая программа для on-fly визуализации наблюдательных данных. С помощью этого сервиса выполняется визуализация любых типов файлов, полученных на оптических телескопах обсерватории.

Таково текущее состояние ИПС общего архива наблюдений обсерватории.

2. Реализация веб-доступа к радиоастрономическим наблюдениям

Архив радионаблюдений, получаемых на радиотелескопе РАТАН-600 на радиометрах континуума, существует, начиная с первой половины 1980-х, и постоянно пополняется. Архив поддерживается своей авторской информационно-поисковой системой. Сложилась ситуация, когда надо поместить полностью архив радиоастрономических данных, который лишь малой частью был представлен в общем архиве САО РАН, в ИПС общего архива. Архив радиоастрономических наблюдений в континууме, для которого реализуется миграция в новую среду хранения, охватывает диапазон дат, начиная с 1982 г. по 2014 г., включает 6 локальных архивов (с ref1 по ref6) общим количеством порядка 0.5 миллиона файлов объемом 75 ГБ данных.

Каждый локальный архив включает данные, полученные на определенном типе облучателя. Файлы могут содержать наблюдения, проведенные на одном радиометре, - одночастотные, или

наблюдения, которые получены одновременно на нескольких радиометрах, связанных с одной системой сбора, - многочастотные. Отметим, что для каждого локального архива диапазон дат свой (ref1: с 1982 г.; ref2: с 2011 г.; ref3: с 2013 г.; ref4: - 2011-2013 гг.; ref5: 2008 г.; ref6: - 1998 г.). Пополняются архивы ref1, ref2 и ref3, остальные коллекции не пополняются. Архив радиоастрономических наблюдений весьма разнородный. Данные получены на нескольких поколениях систем сбора радиотелескопа и различаются как структурой, так и набором параметров, описывающих наблюдения.

Для миграции архива в новую среду хранения и организации доступа к данным была разработана поэтапная стратегия, которая включает этап преобразования данных согласно правилам архивной системы (реинженеринг), погружение файлов в архивную систему (миграция) и модернизация веб-интерфейса архивной системы. Далее этапы описываются более подробно.

2.1. Реинженеринг

В архивной системе архивируемый диск должен включать метку тома, которая является файлом нулевой длины, где имя формируется из порядкового номера диска, названия локального архива и порядкового номера диска в локальном архиве. Диск должен содержать каталоги с наблюдениями, причем данные одной наблюдательной даты записываются в один каталог, и название каталога содержит дату наблюдения. И прежде всего, необходимо организовать коллекции радиоастрономических данных согласно этим правилам.

Поступившие коллекции радиоастрономических наблюдений организованы в виде иерархии каталогов. Каталог верхнего уровня имеет название, соответствующее названию локального архива, т.е. ref1, ref2, ref3, ref4, ref5, ref6. Каталоги второго уровня включают данные, разделенные по годам наблюдений, каталоги третьего уровня – данные по месяцам наблюдений. И на четвертом уровне находятся собственно файлы с наблюдениями. Причем файл может содержать наблюдения на одной частоте (одночастотные файлы) или наблюдения на нескольких частотах, проведенных в одно и то же время (многочастотные файлы). Файлы записаны в форматах [8, вторая глава] – F-формат (до 1994 г.) и RFLEX (начиная с 1994 г.). Эти форматы по ключевым словам и структуре записи данных близки FITS-формату, но отличаются от последнего структурой строк заголовка файла, описывающего наблюдение. Система регистрации записывает дату наблюдений в заголовке наблюдательных файлов в ключевое слово DATE-OBS в формате «22/06/90».

Была реализована программа, которая выполняет анализ заголовка файла на предмет определения даты наблюдения и перезаписывает файл в иерархию каталогов, организованных в соответствии с правилами архивной системы общего архива наблюдений обсерватории. Была выполнена программная реорганизация данных и запись на оптические диски, которые теперь включены в off-line хранилище. Всего записано 20 оптических дисков. Данные подготовлены для следующего этапа.

2.2. Миграция

Как отмечалось в предыдущем параграфе, таблицы ИПС по частоте обновления разделяются на справочные таблицы, в которые новые записи добавляются при внесении нового локального архива, и те таблицы, которые пополняются при внесении нового архивного диска. Алгоритм добавления наблюдательных файлов при формировании записи использует информацию из справочных таблиц. Это и определяет стратегию миграции. На первом этапе необходимо обновить справочные таблицы, а на втором, собственно, выполнить внесение информации о каждом файле.

Например, в следующие справочные таблицы необходимо добавить информацию о новых коллекциях (см. рис. 1): telescope - варианты названий радиотелескопа, instrument - варианты названий комплекса радиометров, obsmode - режимы наблюдений и т.д. Для внесения новых вариантов необходимо провести программный анализ заголовков наблюдательных файлов, выбрав названия из соответствующих ключевых слов заголовков и сравнив их с имеющимися в таблицах.

Обновление потребуется и для специальной таблицы keywordic, в которой связываются названия ключевых слов и атрибуты ИПС. В нее следует включить все ключевые слова, которые есть в заголовках локальных архивов радионаблюдений.

После того как в справочные таблицы будет внесена вся необходимая информация, можно приступать к следующему этапу миграции - загрузке архивных дисков с радионаблюдениями в ИПС. Для загрузки данных используются соответствующие bash-программы, которые реализованы для этой операции.

2.3. Веб-доступ

Для организации свободного доступа к данным после их помещения в ИПС архива требуется изменение веб-интерфейса системы, куда надо добавить новые локальные архивы. Модернизация инферафайса включает как изменения веб-формы, так и расширения набора параметров, которые используются в меню. Это и будет завершающим этапом реализации веб-доступа к локальным архивам радионаблюдений.

3. Заключение

Архивные данные часто используются в исследованиях небесных объектов не только для изучения переменности блеска, но и из-за изменения методов обработки и анализа данных. Возникновение новых направлений исследований здесь также играет роль. По этой причине неограниченное по срокам хранение данных входит в компетенцию обсерваторий. Задача гарантированной сохранности цифровых данных на интервалах от 2-3 десятков лет и более не является решенной. Любые современные носители, включая DVD-диски, флеш-память, винчестеры, системы хранения данных и облачные хранилища, не годятся для долгосрочного архивного хранения. Это относится и к программному обеспечению, и к оборудованию ввода-вывода.

Архив САО РАН располагает цифровыми коллекциями с охватом интервала дат в несколько десятилетий. Как любая достаточно долгоживущая система архив, принципы его организации и хранения меняются по сравнению с тем, что было в самом начале. Из-за эволюции методов наблюдений на телескопах обсерватории и, как следствие, появление новых цифровых коллекций нам необходимо унифицировать хранение данных, погружение новых коллекций и доступ к данным. При проведении миграции архива радиоастрономических наблюдений эти стратегии будут опробованы и проверены. Это послужит основой для поддержки на базе архивной системы обсерватории хостинга новых цифровых коллекций наблюдений, не исключая и архивы других обсерваторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Vitkovskij, V. Chernenkova, N. Kalinina, et. al, Baltic Astronomy, 2000, 9, 578-582 (2000).
2. Витковский В.В., Желенкова О.П., Малькова Г.А. и др. Bulletin SAO, т. 58, 52-63 (2005).
3. Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А. и др. препринт САО РАН, N219, 33c (2007).
4. Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А., Электронные библиотеки, т.13, вып. 4 (2010).
5. FITS: A Flexible Image Transport System, Wells, D.C., Greisen, E.W., and Harten, R.H., Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 44, 363-370 (1981).
6. UCD (Unified Content Descriptor) – moving to UCD1+, S. Derriere, N. Gray, R. Mann, et al., IVOA Workig Draft 2004-04-26, <http://www.ivoa.net/Documents/UCD/WD-UCD-20040426.html>.
7. Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А. и др. препринт САО РАН N219, 37c. (2007); <https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Preprints/2007/N219.pdf>.
8. Верходанов О.В. Дисс. на соискание ученой степени д. ф.-м.н. (2005); http://sed.sao.ru/~vo/disser/d_r.html.

Комаров Владимир Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Для определения оптимальных значений пространственно-временного разрешения фотоприемных систем оптических телескопов среднего класса использован параметрический синтез наблюдательных систем. На примере одного из оптических телескопов САО РАН - Цейсс-1000, показано аналитическое решение для определения оптимальных значений пространственно-временной дискретизации светоприемной аппаратуры.

Ключевые слова: наблюдатель, телескоп, параметрический синтез.

Annotation. To determine the optimal values of the space-time resolution of photodetector systems of optical telescopes of the middle class, parametric synthesis of observing systems was used. On the example of one of the optical telescopes of the SAO RAS - Zeiss-1000, an analytical solution is shown for determining the optimal values of the space-time discretization of the light receiving equipment.

Keywords: an observer, an telescope, parametric synthesis.

Наблюдательные системы оптического телескопа Цейсс-1000

Телескоп Цейсс-1000 системы Ричи-Кретьена относится к телескопам среднего класса (размера) и имеет два фокуса:

F_1 - фокус Кассегрена (рис.1) с фокусным расстоянием 13.3м

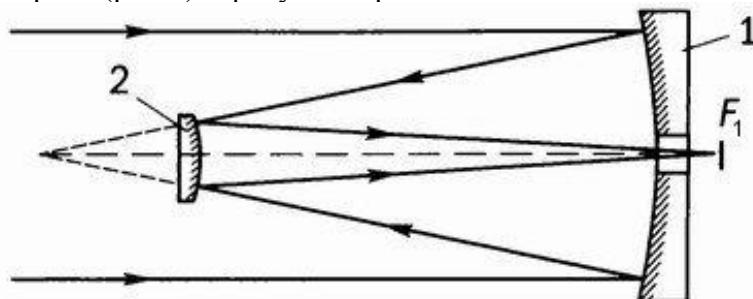


Рисунок 1 – Телескоп системы Ричи-Кретьена со схемой Кассегрена

и F_2 - фокус Куде (рис.2), вынесенный от телескопа на 36.5м.

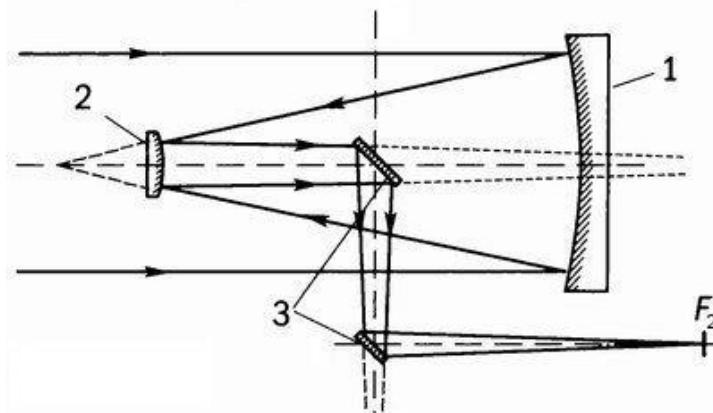


Рисунок 2 – Телескоп системы Ричи-Кретьена со схемой Кудэ

1 - главное зеркало диаметром 1м.

2 - вспомогательные (вторичные) зеркала. Для каждого фокуса свое вспомогательное зеркало. Одно перенаправляет лучи от главного зеркала в фокус Кассегрена через отверстие главного зеркала, другое – через систему плоских зеркал в фокус Кудэ.

В фокусе Кассегрена (непосредственно на трубе телескопа) можно расположить навесную аппаратуру максимальным весом до 96кг. Поэтому на данное оборудование накладываются ограничительные требования, как по весу, так и по габаритам. В фокусе Куде можно располагать крупногабаритное оборудование.

Первый свет на Цейсс-1000 был получен в октябре 1989г. и самыми первыми фотоприемниками, на которых сохраняли изображения звезд, являлись фотопластиинки. Для фотографирования протяженных объектов прилагалась дополнительная оптическая система с коллиматором и камерой Шмидта. В качестве фотоматериала использовали квадратные пленки размером 25 мм, которые изготавливались из пленок стандартного формата с помощью специального приспособления.

Кроме камер для прямых снимков на фотопластинах телескоп был укомплектован спектрографами для двух фокусов. Универсальный астрономический дифракционный спектрограф («UAGS»), разработанный на н/п «Карл Цейсс ЙЕНА», имел небольшой вес (менее 60 кг), что позволило использовать его в фокусе Кассегрена. Камера с внешним фокусом, а также камера с большим линейным полем зрения позволяли применять на данном спектрографе усилители яркости различных типов. Спектрограф для фокуса куде также был изготовлен немецкими специалистами и был укомплектован тремя камерами для получения изображений на фотопластиинках.

Другим прибором, с помощью которого проводились наблюдения в первый год работы телескопа, был телевизионный спекл-интерферометр, созданный сотрудниками САО на основе первых отечественных ЭОПов с микроканальным усилением, сочлененных через оптоволоконную плоскую шайбу с телевизионной трубкой суперкремникона.

В середине 90-х г.г. телевизионные трубы вытесняются быстродействующими ПЗС-системами. А также фотопластиинки заменяют на ПЗС-матрицы, которые становятся основными светоприемниками в астрофизических наблюдениях. Одним из первых основных приборов на Цейсс-1000 становится ПЗС-фотометр, который был разработан и изготовлен в САО и введен в эксплуатацию в марте 1994г. Фотометр состоит из 8 фильтров, включает в себя автоматическое дистанционное управление фильтрами, затвором, позволяющим делать короткие экспозиции до долей секунды. Фотоприемная часть также была изготовлена сотрудниками САО (лаборатория перспективных разработок) на основе ПЗС-матрицы 520x580 пикселов с виртуальной фазой, объемным каналом, квантовой эффективностью около 60% и шумом 18e.

В связи с активным внедрением ПЗС-матриц в САО в эти же годы на телескопе разрабатывается новый прибор на базе куде-спектрографа: эшелле-спектрометр CEGS для решения задач в области астроспектроскопии с высоким и сверхвысоким разрешением. Современные требования звездной спектроскопии таковы, что необходимо обеспечить высокое спектральное разрешение ($R > 30000$) в широком спектральном диапазоне с отношением сигнал/шум > 100 . И в сочетании с ПЗС-матрицей эшелле-спектрометр как раз и реализует такие предельные параметры. Куде-эшелле-спектрометр был собран в 1995г. и с 1996г. на нем проводятся наблюдения с фотоприемником на базе ПЗС-матрицы 580x520 пиксел, с размером пикселя 24мкм.

Кроме основных фотоприемников в состав спектральной аппаратуры должны входить так называемые фото-гиды [1] или наблюдательные системы подсмотра звездной площадки, куда смотрит телескоп, для визуального наведения звезды на щель спектрографа и удержания заданного объекта на щели во время его сопровождения, т.е гидирования. Первые такие системы для спектрографов в САО изготавливались на основе телевизионных трубок суперортikon ЛИ-217. Недостатками данных фотоприемников были нелинейные эффекты преобразования слабых изображений в видеосигнал, нестабильность телевизионного растра, что не позволило использовать их в измерительных системах. В дальнейшем, стали использовать фотоприемники с кремниевой мишенью (суперкремникон ЛИ-702), которые обладают линейностью световой характеристики, наиболее чувствительны в своем классе, имеют больший динамический диапазон и, наконец, более просты в эксплуатации. А в сочетании с ЭОПом чувствительность подсмотровой системы была увеличена на 2-3 порядка.

С началом 2000-х г.г. параметры новых ПЗС-матриц улучшились настолько, что наметилась тенденция в разработке фотоприемной аппаратуры без ЭОПов. В частности, для создания новых

подсмотровых систем телескопа Цейсс-1000, ПЗС-приемники с дистанционным управлением параметрами матрицы оказались наилучшим решением [2]. Одновременное поддержание в работоспособном состоянии более десятка таких систем в наших условиях оправдывает себя только тогда, когда системы идентичны или унифицированы. Подсмотры на базе малоформатных ПЗС с компьютерным управлением и охлаждением содержат серийно выпускаемые компоненты. Компьютерное управление параметрами нового подсмотра спектрографа UAGS без ЭОПа [3] дает возможность увеличивать время накопления на ПЗС до 2048 кадров (экспозиция до 40 секунд) с дискретностью предустановки 1 кадр (1/50 сек). Термоэлектронное охлаждение ПЗС-матрицы в подсмотре спектрографа UAGS понизило уровень шума и полностью устранило свечение «горячих» пикселов при увеличении времени накопления на ПЗС до 40 секунд. При этом значение сигнал/шум наблюдаемых объектов в данном подсмотре повысилось в 1.5 раза по сравнению с неохлаждаемым подсмотром при прочих равных условиях.

На базе унифицированных фотоприемников разработаны и внедрены в эксплуатацию уникальныеочные системы "обзор неба" [4] с переменным полем зрения от 5 до 55 градусов и фиксированные обзоры на 140 и 180 градусов для дистанционного мониторинга в реальном времени ночного состояния облачности [5]. Системы работают с автоматической коррекцией ее основных параметров для работы в необслуживаемом режиме.

Модель наблюдателя на средних оптических телескопах

Рассмотрим наблюдательную систему оптического телескопа, как наблюдателя в теории управления, который получает данные об исследуемом объекте. Эти данные (изображения звездных площадок) пройдя сквозь турбулентную атмосферу, попадают в фокальную плоскость объекта (телескопа). Наблюдатель может воздействовать на систему управления телескопом таким образом, что корректирует фазовые координаты телескопа с целью уменьшения ошибок сопровождения. В дальнейшем, полученные данные фиксируются в архиве, к которому осуществляется доступ для последующей обработки полученного материала.

Процесс получения данных от исследуемого объекта можно рассмотреть на базе следующей модели [6]:

$$\langle S_0 \rangle \longrightarrow \langle S_M \rangle \longrightarrow \langle n_M \rangle \longrightarrow \langle n \rangle \longrightarrow \langle n_d \rangle \longrightarrow x(t)$$

Световое поле $\langle S_0 \rangle$ от исследуемого точечного объекта, проходя через атмосферу и оптику телескопа диаметром D, создает в фокальной плоскости телескопа оптическое изображение $\langle S_M \rangle$.

Наблюдатель, установленный в фокальной плоскости телескопа, преобразует изображение $\langle S_M \rangle$ с помощью входного фотокатода в поток первичных фотоэлектронов $\langle n_M \rangle$, которые, в процессе дальнейшего электронно-оптического преобразования образуют зарядовый рельеф $\langle n \rangle$, пропорциональный интенсивности оптического изображения за время T.

В фотоприемнике, в процессе поэлементного считывания мишени или ПЗС матрицы зарядовый рельеф преобразуется в сигнал $\langle n_d \rangle$, статистические характеристики которого определяют качество наблюдаемого изображения.

На выходе наблюдательной системы получаем информацию $x(t)$ о процессе движения визирной оси вокруг требуемой кривой движения телескопа.

Процесс движения визирной оси вокруг требуемой кривой движения телескопа показан на рис.3

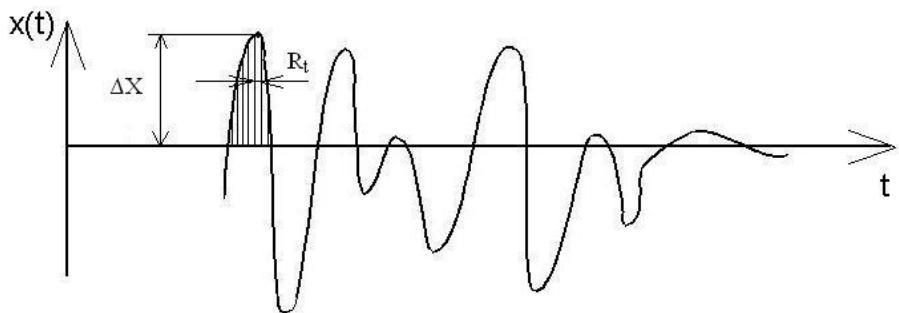


Рисунок 3 – Исследуемый процесс $x(t)$

R_t – интервал корреляции,
 ΔX – величина промаха.

Особенностью параметрического синтеза наблюдательных систем оптических телескопов является определение оптимальных значений пространственного и временного разрешения фотоприемников, обеспечивающих потенциальную точность измерения пространственно-временных координат звёзд.

В статье [6] подробно описано исследование граничных условий наблюдательных систем больших оптических телескопов с использованием параметрического синтеза для определения оптимальных параметров данных систем.

В статье [7] приводится параметрический синтез для оптимизации динамического диапазона и усиления подсмотровых устройств.

Здесь же мы для оптимизации параметров наблюдательной системы рассмотрим аналитическое решение задачи минимизации ошибки сопровождения объекта.

Аналитическое решение задачи минимизации ошибки сопровождения объекта

При сопровождении объекта (звезды) на точность измерения пространственно-временных координат звёзд влияет общая ошибка сопровождения ε :

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{лин}} + \varepsilon_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{лин}} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_t$ – пространственно-временные ошибки сопровождения,

$\varepsilon_{\text{ш}}$ – шумовые ошибки сопровождения, связанные с фотонными шумами звёзд и шумами считывания изображения с твердотельного фотоприёмника. Общие шумы определяются через σ^2_Σ – дисперсию шума процесса $x(t)$:

$$\sigma^2_\Sigma = \sigma_m^2 + \sigma_\phi^2 + \sigma_t^2 + \sigma_w^2 + \sigma_k^2,$$

где σ_m – фотонный шум звёзд,

σ_ϕ – шум фона неба,

σ_t – шум термоэлектронной эмиссии,

σ_w – шум наблюдателя (фотоприемника),

σ_k – шум считывания изображения с твердотельного фотоприёмника.

Учет шумовых ошибок подробно описан в [6].

Оптимизируем параметры фотоприемника, исходя из критерия минимизации ошибки сопровождения объекта для данной модели:

$$\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\min}.$$

Строго говоря, ошибки из-за геометрических искажений растра в оптической системе и фотоприемнике $\varepsilon_x + \varepsilon_y = \varepsilon(\Delta/d)$ – зависят от элемента разложения фотоприемника Δ и не являются линейной функцией (рис.4).

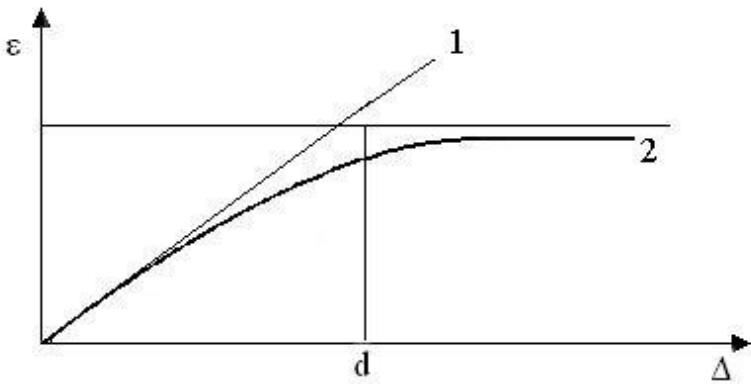


Рисунок 4 – Зависимость ошибки сопровождения объекта от элемента разложения,

где: d – кружок рассеяния оптического изображения на первом фотокатоде,
 $\Delta(x,y)$ – элемент разложения фотоприемника,

Пространственные ошибки процесса $x(t)$ можно представить следующим образом:

$$\varepsilon_x = (\Delta_x/R_x)^2, \varepsilon_y = (\Delta_y/R_y)^2 \quad (2)$$

Учет временных ошибок позволит найти время кадра T_k оптимальное для нашего случая:

$$\varepsilon_t = T_k/R_t \quad (3)$$

Учет шумовой ошибки в первом приближении можно определить по формуле Вудвода [8], устанавливающей связь среднеквадратичной ошибки $\varepsilon_{\text{ш}}$ с кружком рассеяния оптического изображения d и отношением сигнал/шум ψ :

$$\varepsilon_{\text{ш}} = d^2/\psi^2, \quad (4)$$

где $\psi^2 = N_c^2/(N_c + N_\phi) \sim N_c$.

Для нашей модели [9]: $N_c = \Delta^2 T_k Q$,

где Q – параметр освещенности.

В соответствии с формулой (4) шумовую ошибку можно представить в следующем виде:
 $\varepsilon_{\text{ш}} = d^2/(\Delta^2 T_k Q)$

Тогда, в общем виде, суммарная ошибка (1) сопровождения объекта наблюдателем с учетом (2), (3) и (4) примет вид:

$$\varepsilon = (\Delta_x/R_x)^2 + (\Delta_y/R_y)^2 + T_k/R_t + d^2/(\Delta^2 T_k Q) \quad (5)$$

Астрономические объекты сопровождения – это, как правило, звездные изображения, имеющие световое пятно с кружком рассеяния d , поэтому пространственные интервалы корреляции процесса $x(t)$ можно задать в виде:

$$R_x = R_y = d$$

Элемент разложения фотоприемника будем считать квадратным:

$$\Delta_x = \Delta_y = \Delta$$

Тогда аналитическое выражение (5) примет следующий вид:

$$\varepsilon = 2(\Delta/d)^2 + T_k/R_t + d^2/(\Delta^2 T_k Q) \quad (6)$$

Проведем аналитическое исследование для (6) с учетом априорной информации. Существуют известные решения задачи минимизации ошибок измерения пространственно-временных координат световых пятен в системах анализа искажений волнового фронта, возникающих в силу турбулентности атмосферы [10]:

1. Одномерный детерминированный процесс по (R_x, R_y) , когда кадровая частота постоянна ($T_k = \text{const}$), а минимизация ошибок определяется элементом разложения фотоприемника ($\Delta = \text{var}$) по максимуму отношения сигнал/шум.

2. Двумерный случайный процесс по (R_x, R_y, R_t) , когда кадровая частота переменна ($T_k = \text{var}$). Задача решается для анализатора волнового фронта методом Гартмана. Здесь минимизация ошибок определяется числом микролинз маски Гартмана-Шака ($N_{\text{линз}} = \text{var}$).

Результатом решения являются оптимальные $N_{\text{линз}}$ и $T_k \sim f(R_x, R_y, R_t, Q)$ [11].

Наш вариант отличается от вышеперечисленных тем, что необходимо рассматривать решение двумерной задачи – одновременное рассмотрение данного процесса по времени и пространству для детерминированного процесса по (R_x, R_y) и случайного процесса по R_t . Определимся с априорной информацией для нашей модели определения точечных звездных объектов с помощью телевизионных наблюдателей на средних оптических телескопах.

Априорная информация:

m – видимая звездная величина наблюдаемого объекта;

D – диаметр входного зрачка телескопа;

d – диаметр кружка рассеяния;

$F_{\text{сч max}}$ – максимальная частота считывания ТВ камеры;

A^2 – размер поля зрения,

$Q = 10^{11} 2.5^{-m} \pi D^2 / 4$ – параметр освещенности.

Аналитическое исследование (6) с учетом априорной информации приведет в результате к решению, при котором будут получены оптимальные Δ и T_k при которых $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\min}(\Delta, T_k)$.

Т.е. ε_{\min} можно найти из условия:

$$d\varepsilon / d\Delta = 0, \quad d\varepsilon / dT_k = 0.$$

Найдем решение (6) в соответствии с этими условиями.

1. $d\varepsilon / d\Delta = 0$:

$$\begin{aligned} d\varepsilon / d\Delta &= 4(\Delta/d2) - 2d2/(\Delta^2 T_k Q) = 0 \Rightarrow \Delta^4 = d4/(2T_k Q), \text{ тогда} \\ \Delta^2 &= d^2/(2T_k Q)^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

2. $d\varepsilon / dT_k = 0$:

$$\begin{aligned} d\varepsilon / dT_k &= 1/R_t - d2/(\Delta^2 T_k Q) = 0, \\ T_k^2 &= d^2 R_t / (\Delta^2 Q) \end{aligned} \quad (8)$$

Решая систему уравнений (7) и (8), определим оптимальные параметры Δ^{opt} и T_k^{opt} для ε_{\min} :

$$T_k^2 = d^2 R_t (2T_k Q)^{1/2} / (d^2 Q) \Rightarrow T_k^{3/2} = R_t (2/Q)^{1/2},$$

таким образом, оптимальное время кадра, соответствующее ε_{\min} определяется как:

$$T_k^{\text{opt}} = R_t^{2/3} (2/Q)^{1/3} \quad (9)$$

Оптимальная пространственная дискретизация определяется подстановкой (9) в (7):

$$\begin{aligned} \Delta^2 &= d^2 Q^{1/6} / (2^{1/6} (2Q)^{1/2} R_t^{2/3}) = d^2 / (2^{2/3} Q^{1/3} R_t^{1/3}) \\ \Delta^{\text{opt}} &= d / (2^{1/3} (Q R_t)^{1/6}) \end{aligned} \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) – это результат решения задачи совместной оптимизации пространственно-временной дискретизации светового сигнала, который отличается от предыдущих известных решений [10] и [11].

Для нашего случая – движения звезды в фокальной плоскости телескопа, где установлен фотоприемник, а телескоп сопровождает данный объект, процесс $x(t)$ детерминирован по пространственным координатам и является случайным по времени. Рассматривая двумерную задачу одновременно по времени и пространству, выявлена зависимость оптимальной кадровой частоты (формула (9)) только от временных параметров $x(t)$, а оптимальной пространственной дискретизации – не только от пространственных параметров, но также и от временных (формула (10)).

Тогда аналитическое решение для (6) примет следующий вид:

$$\varepsilon_{\min} = (2/Q R_t)^{1/3} + (2/Q R_t)^{1/3} + (2/Q R_t)^{1/3}, \quad (11)$$

т.е.

$$\varepsilon_{x,y \min} = \varepsilon_{t \min} = \varepsilon_{w \min} = (2/Q R_t)^{1/3} \quad (12)$$

Результат (11) показывает, что рассматриваемая модель информационно сбалансирована и все источники ошибок одинаково влияют на конечную точность (12), что является признаком правильно построенной системы наблюдателя с оптимизированными параметрами.

Выводы

В данной статье сделан краткий обзор исторического и современного состояния наблюдательных систем на 1м оптическом телескопе Цейсс-1000. С помощью параметрического синтеза удалось определить оптимальные значения пространственно-временной дискретизации светоприемной аппаратуры. Показано аналитическое решение для достижения оптимальных значений пространственно-временного разрешения данных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В.В. Фотоприемники-гиды оптических телескопов // Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, М., 2014, с.330-331.
2. Комаров В.В., Комаров А.В. Цифровые отечественные ПЗС-камеры для оптических телескопов // Прикладная физика, 2008, №4, с. 142-146.
3. Fomenko A.F., Komarov V.V., Komarova V.N., Fomenko N.A. New ICCD guiding camera for the spectrograph UAGS of the telescope Zeiss-1000 // Bull. Spec. Astrophys. Obs., 2003, v.55, p.143-147.
4. Комаров В.В., Фоменко А.Ф., Шергин В.С. Высокочувствительный ТВ обзор дневного и ночного неба // Труды XXI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, М., 2010, с.181.
5. Комаров В.В. Система мониторинга автоматизированного комплекса оптического телескопа Цейсс-1000 // Сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015, с.351-357.
6. Комаров В.В., Першин И.М. Границные условия наблюдательных систем больших оптических телескопов // Материалы международной научной конференции “Математическая физика и ее приложения” (МФП-2012), т.1, Пятигорск, 2012, с.48-56.
7. Комаров В.В. Синтез телевизионных наблюдательных систем на примере телескопов БТА и Цейсс-1000 // Материалы V Международной научной конференции “Системный синтез и прикладная синергетика” (Сборник научных трудов), т.III, Пятигорск, 2013, с.72-77.
8. Цыцуллин А.К. Телевидение и космос. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – 228с.
9. Комаров В.В., Фоменко А.Ф. Статистические оценки фундаментальных ограничений на применение типовых ПЗС-камер в составе ТВ-подсмотров больших оптических телескопов. // Астрофизический бюллетень, 2007, Т.62, №1, с. 102-116.
10. Цыцуллин А.К. Твердотельная революция в телевидении. – М.: Радио и связь, 2006. – 300с.
11. Войцехович В.В., Анкудинов С.Н., Манцов А.А и др. Быстродействующая телевизионная измерительная система для оценки искажений волнового фронта методом Гартмана. // Оптический журнал, 2000, №2, с.113-119.

*Панчук Владимир Евгеньевич (1,2), Верич Юрий Борисович (1),
Емельянов Эдуард Владимирович (1), Клочкова Валентина Георгиевна (1),
Согоян Арутюн Эдикович (3), Шергин Владимир Сергеевич (1),
Юшкин Максим Владимирович (1), Якопов Григорий Владимирович (1)*

1. Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук
2. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики
3. National Instruments

СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗД: ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Введение

Наблюдения звезд с высоким спектральным разрешением традиционно считаются одним из сложных оптических экспериментов [1]. Влияние методов информатики ощущается с 60-х, когда были построены первые фотометрические комплексы оцифровки фотографических спектрограмм. Развитие комплексов регистрации двумерных изображений в 80-х сдерживалось объемами оперативной памяти и накопителей. Относительная "гармония" на 6-метровом телескопе БТА наступила к началу 90-х, когда были введены первые спектрографы скрещенной дисперсии с матрицами ПЗС [2]. В данном сообщении попытаемся определить роль методов информатики на всех этапах спектроскопического эксперимента и оценить некоторые перспективы, применительно к исследованиям, выполняемым на оптических телескопах САО РАН.

Разработка спектроскопической аппаратуры

Первые отечественные алгоритмы расчета спектральной аппаратуры применялись еще в начале 80-х [3]. Однако астрономической спектроскопии это практически не коснулось, т.к. в 80-е годы промышленная разработка отечественных астрономических спектрографов была прекращена. В САО РАН выделяется период, когда спектральная аппаратура высокого разрешения создавалась без детальных численных расчетов, лишь на основе предыдущего опыта, физического макетирования отдельных технических решений, а также интуитивных соображений. Первые попытки численного моделирования были предприняты на основе программного комплекса Zemax [4]. Современное состояние и перспективы «тотального моделирования» спектроскопического эксперимента изложены в отдельном сообщении [5]. Здесь только отметим, что преимуществом нашего подхода к разработке спектроскопической аппаратуры является многолетний опыт наблюдений на БТА, наличие спектрографов, на которых можно проверить численную модель, и, самое главное, наличие обратной связи в цепочке «заказчик – разработчик – потребитель» (т.к. практически на всех этапах работ участвуют одни и те же сотрудники). При разработке новой спектроскопической аппаратуры мы также используем пакеты программы создания и редактирования твердотельных 3D-моделей - SpaceClaim Engineer. Программные коды систем управления новых спектрографов написаны в среде графического программирования LabView. Для изготовления малогабаритных деталей разработан и изготовлен фрезерный станок с цифровым управлением. Системы управления двух новых, а также проекты реконструкции двух работающих спектрографов построены на базе технологий National Instruments.

Адаптация спектрографа к телескопу

Большие телескопы живут дольше, чем используемая на них спектральная аппаратура. Адаптация нового спектрографа к телескопу начинается на этапах разработки оптической схемы и конструирования. С конца 80-х для БТА было создано несколько спектрографов, предназначенных для спектроскопии звезд [6-12]. Построение полных численных моделей этих конструкций не проводилось, поэтому были и пессимистические прогнозы. Например, в середине 90-х, при разработке Нэсмитовского эшелле спектрографа (НЭС [11-13]), высказывались сомнения относительно механической стабильности громадного спектрографа, устанавливаемого на

подвижной платформе телескопа БТА. Обнаружить предсказанную коллегами нестабильность нам пока не удалось [14, 15]. Строго говоря, без численной модели телескопа моделирование нового спектрографа имеет ограниченную ценность. Численная модель БТА пока не создана.

Системы сопровождения объекта

В первые годы эксплуатации Основного звездного спектрографа (ОЗСП, [16]) БТА обнаружились расхождения между теорией [17] и практикой – проницающая способность спектрографа оказалась на одну звездную величину ниже оценок. Эти расхождения подтвердились для нескольких режимов наблюдений, так что причину следовало искать вне конкретного варианта (камера, дифракционная решетка). Выделяем несколько причин расхождений: а) мягкие условия технического задания на точность сопровождения объекта (напомним, что БТА [18] является первым в мире телескопом с управляющей ЭВМ); б) колебания центра изображения звезды из-за атмосферных условий; в) частая работа системы управления БТА в переходных режимах (“сопровождение” – “коррекция”), последнее вызывало возбуждение собственных частот телескопа. Отработка системы управления БТА выполнялась на макете телескопа (диаметр зеркала $D=0.6\text{м}$, фокусное расстояние $F=12\text{м}$, [19]), имеющего другие собственные частоты. При наблюдениях на БТА выяснилось, что спектры частот атмосферных колебаний центра изображения звезды, и частот колебаний механической конструкции телескопа, генерируемых при работе в переходных режимах, перекрываются. Проблема потери света из-за колебаний изображения звезды на входе спектрографа была решена при разработке оптического корректора положения звезды [20]; в результате астрономы получили выигрыш в одну звездную величину и удобный режим наблюдений, а ресурс системы управления телескопом был существенно продлен. Напомним, что БТА проектировался из расчета 10 наведений за ночь, а штатная система автоматического сопровождения объекта, с использованием гида БТА ($D=0.7\text{м}$, $F=12\text{м}$) – так и не состоялась. Успешно используемая более 15 лет система сопровождения объекта выполняет две функции: коррекцию монотонных трендов рассогласования положения телескопа и объекта, и компенсацию упомянутых колебаний положения центра изображения звезды на входе спектрографа. Эксплуатация первой модели локального корректора [20] позволила предложить новые решения [21, 22], применяемые нами при разработке других спектральных систем.

Системы сбора информации

Достаточно продолжительный период эксплуатации цифровых систем на БТА определил разнообразие и эволюцию методов сбора информации. То, что сейчас сложилось в спектроскопии высокого разрешения, трудно назвать системой, т.к. даже эксплуатация одного и того же спектрографа разными группами приводит к различным способам архивирования. Считывание информации со светоприемника, используемого попаременно на ОЗСП [23] и НЭС [13], сопровождается эпизодическими потерями изображений (с трудно диагностируемыми причинами), поэтому в доводке системы сбора мы видим 10-процентный резерв эффективности наблюдений (доля потерь установлена в процессе наблюдений). Заметим, что с 2011 года на 4 спектрографа [10, 13, 23, 24], стационарно размещенные на БТА, приходится только один светоприемник, так что первостепенной задачей повышения эффективности спектроскопических наблюдений звезд является дооснащение этих спектрографов стационарно установленными светоприемниками различного формата.

Повышение эксплуатационных параметров существующих спектрографов

Оптические схемы разработанных нами спектрографов [10, 13, 24, 25] представляют собой развитие классических решений в семействе дифракционных спектрографов скрещенной дисперсии. Все эти схемы допускают применение нового метода численного моделирования [26]. Как показано в [13] на примере спектрографа НЭС, дальнейшее улучшение параметров возможно в результате дополнительных технических решений, эффективность которых становится очевидной только в результате численного моделирования. На модели показано, что у спектрографа НЭС имеется запас по величине спектрального разрешения R , светосиле по потоку L , и величине

одновременно передаваемых элементов спектра N. Все это позволяет увеличить потенциальное качество спектрографа в разы. Значительная часть этих решений применима и к другим конструкциям [10, 24, 25].

Новые разработки

В настоящее время мы разрабатываем две новые системы: оптоволоконный спектрограф-поляриметр высокого разрешения для 1-метрового телескопа САО (EFES, [27, 28]), и спектрограф-поляриметр высокого разрешения, размещаемый в кабине главного фокуса 6-метрового телескопа [25, 29, 30]. Эти спектрографы оснащаются принципиально новой системой управления [31], позволяющей выполнять наблюдения в режиме удаленного контроля и управления. Разработаны полные численные модели, учитывающие поведение телескопа и земной атмосферы. На 1-метровом телескопе успешно испытана новая система автоматического сопровождения объекта, что подтверждает реалистичность принятой численной модели «телескоп-спектрограф». Для 6-метрового телескопа изготовлен спектрофотометр [32], использующий оптику общего гида БТА ($D=0.7\text{ м}$, $F=12\text{ м}$). Работа на этом спектрофотометре будет выполняться параллельно с наблюдениями на НЭС, без дополнительных потерь времени. С этой целью разработан локальный корректор положения изображения звезды на входе в спектрофотометр, работающий независимо от локального корректора фокуса Нэсмит-2.

Выполняются поисковые исследования в области спектроскопии сверхвысокого разрешения, с применением интерферометров Фабри-Перо [33-36]. Здесь проблема численного моделирования состоит в необходимости доработки пакетов программ с учетом интерферометрических эффектов.

Методы численного моделирования применяются и при разработке орбитальных спектрографов [37] и спектрополяриметров [38].

Подготовка кадров

С 2013 года на базовой кафедре инфокоммуникационных технологий в астрофизике и астроприборостроении Университета ИТМО проводится подготовка магистерских диссертаций. В частности, под руководством одного из авторов (ПВЕ) выполнены работы: «Проект спектрофотометра вспомогательного гида БТА», «Проект информационной системы «Оптические телескопы»», «Проект подвесного спектрографа высокого разрешения для телескопов умеренного диаметра», «Спектрограф высокого разрешения для малых телескопов», «Астрономический спектрограф с интерферометром Фабри-Перо», «Оптоволоконное сочетание спектрографа с телескопом». В обеспечении технической части работ приняли сотрудники лаборатории астроспектроскопии САО РАН [39].

Благодарности

Работа частично поддержана грантом РФФИ (проект 16-02-00587) и Программой поддержки фундаментальных исследований Президиума РАН №28 "Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей", подпрограмма "Астрофизические объекты как космические лаборатории", проект «Развитие и внедрение в наблюдения спектрополяриметра высокого разрешения для обеспечения мониторинга слабых звезд в главном фокусе 6-м телескопа».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Е.Панчук, В.Г.Ключкова. // Природа, 2017, №3, с.47.
2. В.Е.Панчук. // Земля и Вселенная, 2017, №1, с.38.
3. И.В.Пейсахсон. // Оптический журнал, 2002, т. 69, № 1, с.21.
4. <http://www.zemax.com/>
5. М.В.Юшкин, В.Е.Панчук, Т.А.Фатхуллин, Ю.Б.Верич, Г.В.Яколов. // Наст. сборник.
6. Э.Б.Гажур, В.Г.Ключкова, В.Е.Панчук. // Письма в Астрон. журн., 1990, т.16, с.473.
7. В.Г.Ключкова, В.Е.Панчук, В.П.Рядченко. // Письма в Астрон. журн., 1991, т.17, с.645.
8. В.Е.Панчук, В.Г.Ключкова, Г.А.Галазутдинов, В.П.Рядченко, Е.Л.Ченцов. // Письма в Астрон. журн., 1993, т.19, с.1061.

9. Panchuk V.E., Najdenov I.D., Klochkova V.G., Ivanchik A.B., Yermakov S.V., Murzin V.A. // Bulletin of the Special Astrophysical Observatory, 1997, V.44, p.127.
10. Д.Н.Монин, В.Е.Панчук. // Письма в Астрон. журн. 2002. Т. 28, № 10. С. 940.
11. В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова, И.Д.Найденов. // Препринт САО РАН, № 135, 1999.
12. В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова, М.В.Юшкин, И.Д.Найденов. // Оптический журн. 2009, т.76, с.42.
13. В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова, М.В.Юшкин. // Астрономический журнал. 2017, т.94, № 9, с.808.
14. В.Е.Панчук, М.В.Юшкин, Э.В.Емельянов, Препринт САО РАН, № 212, 2007.
15. V.G.Klochkova, V.E.Panchuk, M.V.Yushkin, and D.S.Nasonov. // Astrophys. Bull. 2008, v.63, p.386.
16. А.С.Васильев, А.М.Евзеров, М.В.Лобачев, И.В.Пейсахсон. // Оптико-механич. промышл., 1977, вып.2, с.31.
17. В.С.Рылов. // Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1970, т.2, с.121.
18. Б.К.Иоаннисиани. // Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1971. т.3. с.3.
19. Я.Б.Вятскин, А.С.Найшуль, Е.М.Неплохов. // Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1971. т.3. с.20.
20. А.А.Иванов, В.Е.Панчук, В.С.Шергин. Препринт САО РАН, №155, 2001.
21. М.В.Якопов, Г.В.Якопов, В.Е.Панчук, Патент RU 2482525 C2, 17.08.2011.
22. М.В.Якопов, Г.В.Якопов, В.Е.Панчук, М.В.Юшкин, Патент RU 2484507 C2, 17.08.2011.
23. Panchuk, V. E.; Chuntonov, G. A.; Naidenov, I. D. // Astrophysical Bulletin, 2014. v.69, p.339.
24. Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Юшкин М. В., Якопов Г. В., Верич Ю. Б. // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. т.59, № 12. с.1018.
25. Панчук В. Е., Клочкова В. Г., Юшкин М. В., Якопов Г. В., Верич Ю. Б. // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. т.60, № 1. с.53.
26. Yushkin, M.V., Fatkhullin, T.A., Panchuk, V.E. // Astrophysical Bulletin, 2016. v.71, p.343.
27. Panchuk, V. E.; Yushkin, M. V.; Klochkova, V. G.; Yakopov, G. V.; Verich, Yu. B. // Astrophysical Bulletin, 2015. v.70, p.226.
28. Panchuk, V., Yushkin, M., Klochkova, V., Verich, Yu., Yakopov, G. // Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars, ASP Vol. 494 Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, 25-31 August 2014. Edited by Yu. Yu. Balega, I. I. Romanyuk, and D. O. Kudryavtsev. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.334.
29. Panchuk, Vladimir; Yushkin, Maxim; Klochkova, Valentina; Sachkov, Mikhail. // Proceedings of the SPIE, Volume 9908, id. 99086Y 6 pp. (2016).
30. Panchuk, V. E.; Klochkova, V. G.; Yushkin, M. V.; Yakopov, G. V.; Verich, Yu. B.; Sachkov, M. E. // Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Edited by Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2017, p.562.
31. Soghoyan, H. E.; Yakopov, G. V.; Verich, Yu. B.; Emelianov, E. V.; Yushkin, M. V.; Panchuk, V. E. // Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Edited by Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2017, p.554.
32. Panchuk, V.; Verich, Y.; Klochkova, V.; Yushkin, M.; Yakopov, G.; Sergeev, D. // Physics and Evolution of Magnetic and Related Stars, ASP Vol. 494 Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia, 25-31 August 2014. Edited by Yu. Yu. Balega, I. I. Romanyuk, and D. O. Kudryavtsev. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2015, p.337.
33. Panchuk, V. E.; Klochkova, V. G.; Sachkov, M. E.; Yushkin, M. V. // Solar System Research, 2015. v.49, p.420.
34. Kulagin, E.S.; Panchuk, V.E. // Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Edited by Yu. Yu.

Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2017, p.554.

35. Panchuk, V.E.; Verich, Yu.B.; Klochkova, V.G.; Sachkov, M.E.; Sendzikas, E.G.; Yushkin, M.V.; Yakopov, G.V.; Kulagin, E.S. // Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Edited by Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2017, p.566.

36. В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова, Д.В.Марченко, Е.Г.Сендзикас, М.В.Юшкин. // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 8.

37. Panchuk, Vladimir; Yushkin, Maxim; Fatkhullin, Timur; Sachkov, Mikhail. // Astrophysics and Space Science, 2014. v.354, p.163.

38. Yushkin, Maxim; Panchuk, Vladimir; Pereira Abarca, Belén.; Marcos-Arenal, Pablo; Sachkov, Mikhail; Gómez de Castro, Ana I. // Proceedings of the SPIE, Volume 9905, id. 99052Z 9 pp. (2016).

39. <http://www.sao.ru/hq/ssl/>

Эверстов Николай Петрович, Богод Владимир Михайлович,
Курочкин Евгений Анатольевич

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

МНОГОКАНАЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА РАДИОСПЕКТРОГРАФЕ РАТАН-600

Аннотация. В работе представлено исследование эффективности критерия прогноза солнечной активности Танаки-Эноме по радиоастрономическим наблюдениям активной короны Солнца. Показана зависимость качества прогнозирования от уровня чувствительности приемной системы на коротких волнах и текущего 11-летнего цикла активности Солнца. Приведены результаты прогнозирования вспышечной активности, полученные по данным спектрально-поляризационных наблюдений активных областей (AO) в микроволновом диапазоне на радиотелескопе РАТАН-600.

Ключевые слова: Солнце, спектрально-поляризационные наблюдения, методы, радиоконтинуум, солнечные вспышки, прогнозирование солнечной активности, протонные события.

Annotation. In this paper, were made a research of the effectiveness of the Tanaka-Enome solar activity forecasting criterion with radio astronomical observations of the Sun's active corona. Showed the dependence of the forecasting quality by the level of sensitivity of the receiving system on short waves and the current 11-year cycle of the solar activity. Results of prediction of flare activity from the spectral-polarization observations of active regions (AR) in the microwave range at RATAN-600.

Keywords: Sun, spectral-polarization observations, method, radio continuum, flares prediction, proton events.

Введение

Цель работы состоит в проведении исследований направленных на анализ эффективности прогноза солнечной активности по радиоастрономическим наблюдениям активной короны Солнца. Задача прогнозирования вспышечной активности (протонной, в частности) является комплексной проблемой, включающей разносторонние данные с различных слоев солнечной атмосферы. Развитие активности проходит в общем случае в несколько стадий. Начиная со стадии зарождения активности, которая характеризуется всплытием группы пятен на солнечную поверхность, далее, под воздействием вертикальных или горизонтальных перемещений магнитных потоков происходит всплытие новых пятен, которые могут быть зарегистрированы средствами оптических магнитографов. Дополнительно всплытие нового магнитного потока на уровне нижней короны может быть зарегистрировано в радиоизлучении с помощью чувствительных поляризационных наблюдений в широком диапазоне длин радиоволн. Это начальная стадия зарождения активности, часто имеющая длительность около 1-3 дней, прослеживается на радиотелескопах с большой эффективной площадью. Многоволновые наблюдения на РАТАН-600 в микроволновом диапазоне являются уникальными ввиду широкого частотного диапазона 1-18 ГГц, высокой чувствительности по потоку излучения, одновременности получения спектрально-поляризационных характеристик [1-2].

Задача работы заключается в проведении анализа эффективности критерия для автоматического прогноза крупных солнечных вспышек на основе спектральных данных микроволнового излучения активных областей на Солнце.

1. Формирование базы данных на сервере “ПРОГНОЗ”

Данные солнечного спектрально-поляризационного комплекса РАТАН-600 (ССПК РАТАН-600) передаются на сервер регистрации, расположенный непосредственно в приёмной кабине. Данные формируются в формате RAW (каждое наблюдение – порядка 60 МБ), и далее происходит процедура конвертации с помощью программы «arm2fits» в fits-формат, широко примен器ющийся

для записи астрономических наблюдений. Этот формат является первичным и поступает в архив наблюдений. Для уменьшения размеров файлов при их транспортировке на сервера обработки, используется сглаживание по 30 точек и размер файла уменьшается примерно до 2 МБ. Для большинства исследовательских задач такое сглаживание не ухудшает качество данных, однако, в случае необходимости есть доступ и к исходным RAW-файлам. Далее данные поступают в сеть Интернет и доступны профессиональным пользователям. На сервер ПРОГНОЗ данные поступают в среднем через 4 минуты после завершения наблюдений. На сервере ПРОГНОЗ в программе Cron семейства ОС на ядре Linux заведено расписание, для реализации регулярного скачивания (программой WGet) fits-файлов (raw-файлы в виду большого формата скачиваются во внерабочее время).

После этого проводится дальнейшая обработка данных на сервере ПРОГНОЗ. Fits-файлы открываются на сервере программой на языке IDL (Interactive Data Language) с помощью подпрограммы (англ. «routine») mrdfits, вследствие этого получается трехмерный массив с размерностями: координата x, тип поляризации (параметры Стокса I и V или R и L), частота. Типичный массив одного скана представляет собой массив 2000x2x80 точек. После этого необходимо осуществить две процедуры – нахождение источников на скане и отождествление их с общепринятой всемирной нумерацией активных областей Space Weather Prediction Center (SWPC) National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Для нахождения источников на скане используется метод вписывания гауссианы с помощью подпрограммы gaussfit, которая вписывает гауссиану в виде:

$$f(x) = A_0 e^{-\frac{z^2}{2}} + A_3 + A_4 x + A_5 x^2,$$

$$z = \frac{x - A_1}{A_2}$$

A_0 – высота гауссианы, A_1 – центр гауссианы, A_2 – ширина гауссианы, A_3 – постоянный член, A_4 – линейный член, A_5 – квадратичный член. По параметрам этой гауссианы (коэффициенты A_0 - A_5) можно рассчитать параметры локального источника (ЛИ) для дальнейшего занесения в базу данных (БД) (положение на оси x, поток радиоизлучения, размеры локального источника и др.). Программа на языке IDL подключается к базе данных Oracle с помощью специальных драйверов, производится обращение к базе данных и новая запись параметров ЛИ или замещение (обновление) уже имеющихся параметров ЛИ.

Запись параметров ЛИ в БД осуществляется для структурированности разработки системы отдельной программой на языке Perl, которой передаются все необходимые определенные параметры радиостоиника.

Для отождествления ЛИ с номерами SWPC NOAA используется программа на IDL db_pos2noaa_spectr. С учётом позиционного угла положение АО на диске Солнца сравнивается с положением ЛИ на скане. В случае совпадения с приемлемой точностью (до 10 %), в записи о ЛИ в базе данных присваивается соответствующий номер NOAA. В случае, если в ножеобразную диаграмму направленности системы «Южный сектор с Плоским отражателем» РАТАН-600 попадает несколько АО, в запись о ЛИ добавляется несколько АО, записываемых через символ «_», что допустимо, поскольку информацию о том, будет ли вспышка, можно перенести не на одну какую-то конкретную АО, а на группу АО с соответствующим замечанием.

После того, как найдены ЛИ и они отождествлены с АО, необходимо в БД добавить информацию о вспышках. Для этого используется программа (на Perl), которая обращается к базе данных Solar and Geophysical Activity Summary (SGAS) SWPC, в котором в текстовом виде (ASCII-файлы) есть подробная информация о вспышках (номер АО NOAA, класс вспышки, время начала, максимума и завершения, положение на диске Солнца и др.). Эта информация также добавляется в БД к соответствующей записи об отождествленных ЛИ с номерами NOAA.

Таким образом, в ходе заполнения БД мы имеем список АО с ЛИ на скане СК РАТАН-600, а также их характеристики в радиодиапазоне и информацию о вспышках в соответствующих областях в рентгеновском диапазоне. На основе полученной информации, можно оценивать эффективность прогнозирования по параметрам ЛИ с различными граничными условиями входных параметров,

сравнивая результат прогнозирования с действительно произошедшими событиями в рентгеновском диапазоне (по SGAS).

Для оценки эффективности прогнозирования служит ещё одна программа на IDL, в которой по заданному периоду времени и величине коэффициентов происходит обращение к БД, откуда берутся потоки радиоизлучения и информация о рентгеновских вспышках.

2.Физические основы прогнозирования активности по радиоастрономическим наблюдениям активных областей.

Многоволновые наблюдения на РАТАН-600 в микроволновом диапазоне являются уникальными ввиду широкого перекрытия диапазона частот 1-18 ГГц, высокой чувствительности по потоку излучения, одновременности получения спектрально-поляризационных характеристик. Благодаря перечисленным параметрам этому инструменту доступны спектральные наблюдения ранней стадии зарождения активности, что и используется для развития эффективных критериев прогнозирования вспышечной активности.

Известно, что на поверхности Солнца с 11-летним циклом возникают комплексы активности, определяющие влияние солнечного излучения на процессы в атмосфере Земли. При этом на уровне фотосферы возникают группы пятен с мощными магнитными полями (около 1000-4500 Гс), которые простираются в верхние слои - хромосферу и разреженную корону с электронной температурой $T_e = 10^6$ К. В сильных магнитных полях возникают циклотронные радиоисточники, эффективно излучающие в широком микроволновом диапазоне, причем это излучение имеет круговую поляризацию (R или L), что позволяет определять величину и знак коронального магнитного поля.

Многочисленные поиски эффективных критериев прогноза вспышек связаны именно с поиском источников первоначальных возмущений и первичного разогрева (токовые слои, сложные дельта-конфигурации магнитного поля, пекулярные радиоисточники, высокие яркостные температуры, аномалии в поляризованном радиоизлучении и др.).

На сайте <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/> ведется регулярный прогноз вспышек и протонных событий по спектрально-поляризационным наблюдениям на РАТАН-600. Наиболее исследован и испытан в регулярных наблюдениях критерий Танаки-Эноме [4], суть которого связана с учреждением в коротковолновой части сантиметрового диапазона, путем сравнения потоков излучения на 3 см и на 8 см. Его основная идея была предложена авторами в 1975 г. и объясняла корреляцию с очень мощными протонными вспышками с использованием двух интерферометров в Тойокава. Однако, этот критерий в других циклах плохо выполнялся. Тем не менее, в САО РАН по многоволновым наблюдениям Солнца создана база данных за период с 1991-2017 гг., в которой применялся этот критерий. Благодаря более высокой чувствительности РАТАН-600 эффективность критерия была улучшена.

Следует отметить, что мировой центр (NOAA Space Weather Prediction Center) данных дает трехдневный прогноз, который основан на классификации Макинтоша [3]. При этом определяется вероятность вспышки по степени похожести фотосферных магнитных структур пятен со структурами ранее давшими вспышки. Однако, вероятность предсказанных вспышечных событий невелика (~60-75%). Можно выделить три группы АО по проявлению их вспышечной активности:

1.Стабильные АО: спектры поляризованного потока имеют монотонный и стабильный характер.

2. Нестабильные АО: производят слабые вспышки класса C.

3.Вспышечно-продуктивные активные области (ВПАО): производят мощные вспышки класса M и X в рентгеновском диапазоне.

Пример работы базы данных http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-p?page=rat_search.ion для случая положительного прогноза протонного события приведен на рис.1.

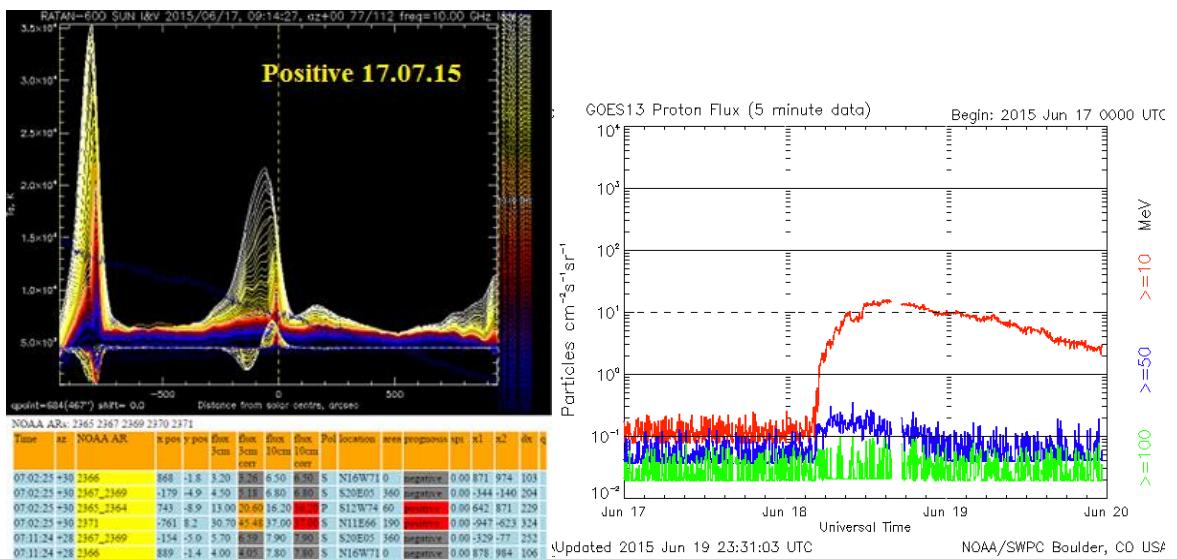


Рисунок 1 – Пример прогноза протонного события.

Слева приведены многоволновой скан диска Солнца на 17/2015. Под сканом приведена часть таблицы, на которой красным указан положительный прогноз вспышки. Справа приведен временной ход регистрации протонных событий на спутнике GOES, демонстрирующий наличие мощного события, предсказанного по наблюдениям на РАТАН-600.

4. Критерий прогнозирования по методу Танака-Эноме

Рассмотрим физические процессы, формирующие микроволновый спектр излучения активной области на уровне нижней короны. Для этого воспользуемся примером для вышеупомянутой активной области NOAA 12371. На рис.19 приведен спектр излучения этой области в диапазоне длин волн от 1.6 см до 30 см. Следует отметить, что получение таких спектров пока недоступно другим радиотелескопам в мире.

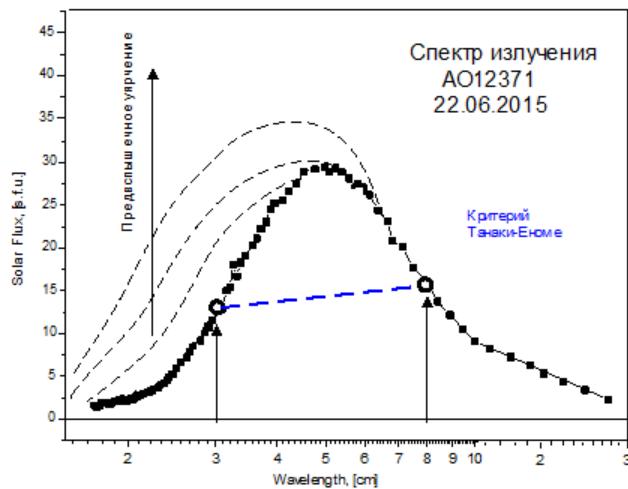


Рисунок 2 – Типичный спектр радиоизлучения активной области на Солнце на примере АО 12371 для 22 июня 2015г.

Синим цветом показаны пределы, в которых вычисляются потоки для стандартного критерия Танаки-Эноме. Пунктиром слева приведены кривые, показывающие ход уярчения спектра в предвспышечной ситуации.

На рисунке 2 продемонстрирован процесс его деформации на предвспышечной стадии. Ход частотной характеристики объясняется свойствами циклотронного излучения на низких гирорезонансных частотах, а именно, на 2-й гармонике на обыкновенной волне, и на 3-й гармонике

гирачестоты на необыкновенной волне. При этом 2-я гармоника расположена значительно ниже чем 3-я, и имеет на 20-30 % большее по величине магнитное поле.

В процессе выхода магнитного поля от фотосферы в корону сначала выходит верхняя 3-я гармоника, потом 2-я. Этим объясняется подъем спектра на коротких волнах в диапазоне от 1.5 см до 6 см. Максимум спектра обеспечен суммарным излучением обеих гармоник. Более высокие гармоники 4-я и выше являются оптически прозрачными и не вкладывают заметного излучения в этот спектр. Дальнейшее понижение спектра в области длинных волн объясняется, понижением плотности плазмы солнечной короны при постоянной температуре около 10^6 К.

Спектр радиоизлучения является весьма эффективным инструментом для оценки уровня активности АО. При вспыштии больших магнитных полей пятен в корону коротковолновая часть спектра участвует. Ранее такой эффект был отмечен в работе [4] авторами Танаки и Эноме, которые указали, что перед мощными вспышками излучение в АО на волне 3 см увеличивается резче, чем на более длинной волне 8 см. Эта ситуация характерна для микроволнового спектра в предвспышечной ситуации, на чем и основано прогнозирование по критерию Танаки-Эноме. Статистика наблюдений помогла установить пределы критерия названного по имени Танаки-Эноме. Критерий эффективно работал для прогноза мощных протонных событий в 20 цикле солнечной активности. Однако, в других циклах оправдываемость этого эффекта резко снизилась.

Следует отметить, что авторы эффекта работали с инструментами низкой чувствительности на двух длинах волн и применяли его для анализа очень мощных событий на Солнце.

На радиотелескопе РАТАН-600, который обладает более высокой чувствительностью, вследствие большой собирающей поверхности, применяется широкодиапазонный приемный комплекс на 112 длинах волн. Поэтому критерий Танаки-Эноме был применен для прогнозирования менее мощных событий с рентгеновскими классами X, M и C.

С целью повышения чувствительности прогноза к слабым вспышкам и более раннему прогнозированию протонных событий отрабатываются различные модификации этого критерия выбором других частотных пар. Такой выбор частот объясняется желанием адаптировать данный критерий для прогнозирования более слабых вспышек (уровня С и ниже), с другой стороны, смещение критерия в сторону коротких волн (с 3 см до 2 см) позволит расширить диапазон регистрации вспышек от протонных событий, в которых протоны ускоряются при сильных магнитных полях с максимумом проявления в миллиметровом диапазоне.

Кроме выбора частотных пар важно также выбрать порог минимального уровня потока излучения F_{3cm}^{min} и величину отношения потоков для обеих частот F_{3cm}/F_{8cm} (см. текст ниже по оценкам качества критерия).

5. Методы оценки эффективности критерия прогнозирования

Для вычисления эффективности прогнозов применяются различные индексы, например, ACC (Accuracy) и TSS (True Skill Statistic) [5]. Для их вычислений приняты следующие названия произошедших событий:

TP = True Positive (верный положительный прогноз, вспышка будет).

TN = True Negative (прогноз негативного события, вспышки не будет).

FP = False Positive – (ошибка положительного прогноза).

FN = False Negative – (ошибка прогноза негативного события).

Индекс ACC выражает отношение количества успешных прогнозов (положительных и негативных) ко всему количеству прогнозов (совместно с ошибочными прогнозами):

$$ACC = \frac{\text{верный прогноз}}{\text{все прогнозы}} = \frac{TP + TN}{NP + FN + FP + TN}$$

Этот коэффициент меняется от 0 до 1 и максимальным результатом является ACC=1.

К сожалению, несмотря на прозрачный смысл этого индекса, для случая редких событий, таковыми являются мощные вспышки, этот индекс малоприменим. К примеру, если событие произошло 5 раз из 100 возможных случаев, то такой прогноз, как “событие не будет никогда” даст

результат 95% успешности. Таким образом (ACC) отображает процент верных прогнозов и менее предназначен для оценки отрицательных прогнозов.

Индекс TSS имеет смысл разности оценок вероятностей прогнозов верного (POD-Probability of Detection) события и ложного (POFD-Probability of False Detection) события соответственно. Он является более подходящим для редких событий и вычисляется следующим образом

$$TSS = POD - POFD = \frac{TP}{TP + FN} - \frac{FP}{FP + TN}$$

Была применена таблица 1 сопряженности.

Таблица 1 – Таблица сопряжённости наблюдений и прогноза

<i>Таблица сопряженности</i>		<i>Прогноз</i>	
		<i>Будет вспышка</i>	<i>Вспышка не будет</i>
<i>Наблюдение</i>	<i>Вспышка произошла</i>	<i>TP</i>	<i>FN</i>
	<i>Вспышки не было</i>	<i>FP</i>	<i>TN</i>

Для оценки качества прогнозирования используются индексы ACC и TSS, которые рассматриваются как функции двух переменных (B и C), применяемые в критерии Танака-Эноме. Здесь принято:

$B = F_{3cm}^{\min}(\lambda)$ - минимальный поток радиоизлучения от АО на выбранной длине волны.

$C = F_{3cm}/F_{8cm}$ - отношение потока излучения на 3 см к потоку на 8 см.

Таким образом, предметом исследований является поведение функций двух переменных для индексов: ACC=ACC (B, C); и TSS=TSS (B, C).

Были проведены расчеты этих индексов для двух периодов регулярных наблюдений с использованием базы данных ПРОГНОЗ:

- 1) Годовой интервал 01.01.2014 г. -01.01.2015 г.
- 2) 2-х годовой интервал 01.01.2015 г. -01.01.2017 г.

Расчет функции ACC (B, C) за годовой интервал:

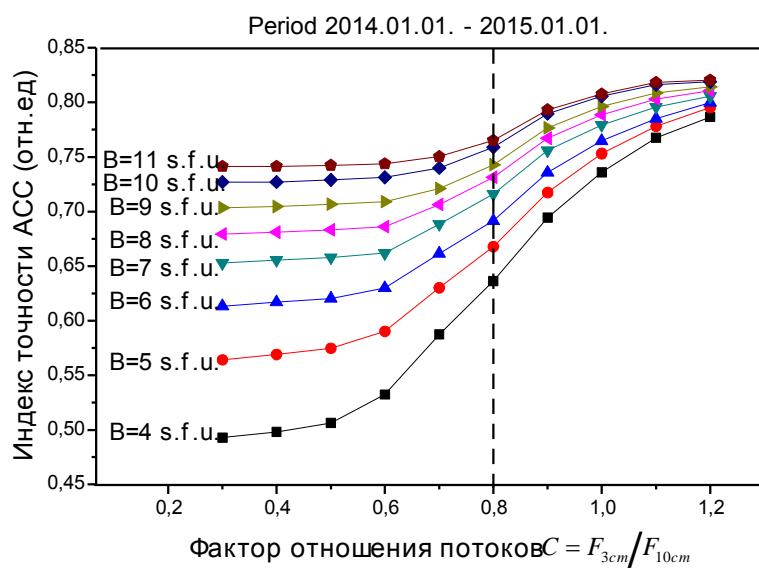


Рисунок 3 – Анализ годового интервала наблюдений радиоизлучения Солнца.

Показан рост чувствительности метода ACC с ростом отношения величин потоков излучения для разных значений минимального уровня потока на короткой волне 3 см.

Расчет функции ACC (B, C) за двух годовой интервала

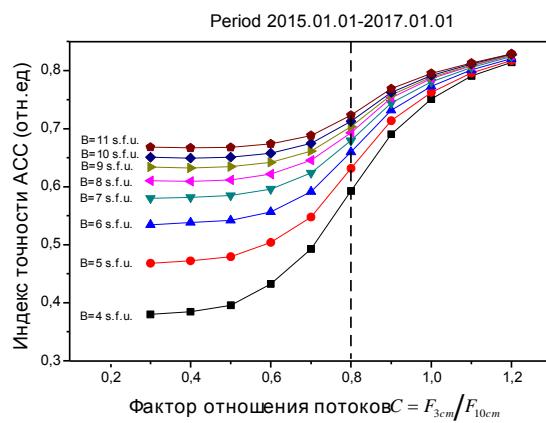


Рисунок 4 – Анализ 2-х годового интервала наблюдений радиоизлучения Солнца.

Рост чувствительности метода ACC с ростом отношения величин потоков излучения для разных значений минимального уровня потока на короткой волне 3 см аналогичен рис.21.

Расчет функции TSS(B, C) за годовой интервал

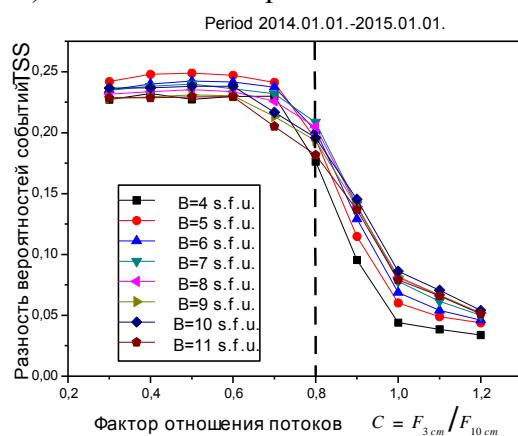


Рисунок 5 – Анализ 1- годового интервала наблюдений радиоизлучения Солнца. ,

Отмечается постоянные высокие значения TSS для значений $C=0,3-0,8$ для значений минимального потока $B=4-11$ s.f.u. и резкий спад TSS в диапазоне выше 0,8.

Расчет функции TSS(B, C) за двух годовой интервал

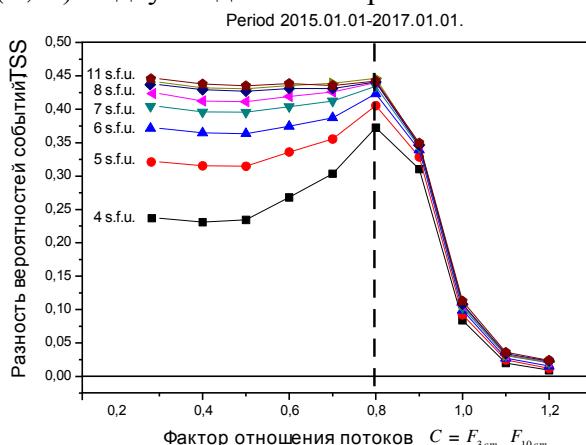


Рисунок 6 – Анализ 2-х- годового интервала наблюдений радиоизлучения Солнца.

Отмечается резкий спад TSS в диапазоне выше 0,8. Постоянные значения TSS сохраняются в диапазоне значений минимальных потоков для $B=8-11$ s.f.u.

6. Дискуссия по результатам анализа

Исследование поведения функций двух переменных для индексов: ACC=ACC (B, C); и TSS=TSS(B, C) представленное на рис.21-24 и в таблицах А1-А-5 и Б1-Б5 показывает следующие свойства радиоастрономического прогноза по наблюдениям на РАТАН-600 с применением критерия Танаки-Энноме:

-Высокие значения индекса ACC достигающие значений вероятности прогноза около 80% на годовом и двухгодовом интервалах.

-Невысокие значения индекса TSS для одногодового интервала около 17% и достаточно высокие значения индекса TSS для двухгодового интервала до 45%.

-Резкие спадания значений TSS с ростом отношения потоков излучения $C = F_{3cm}/F_{8cm}$ при значениях выше 0.8.

Эти результаты указывают с одной стороны на высокое качество наблюдений по ACC, с другой, значительное падение TSS и его зависимость от отношения потоков $C = F_{3cm}/F_{8cm}$ при больших значениях уровня отсечки (параметра $B = F^{\min}$). Интересно рассмотреть причины такого падения.

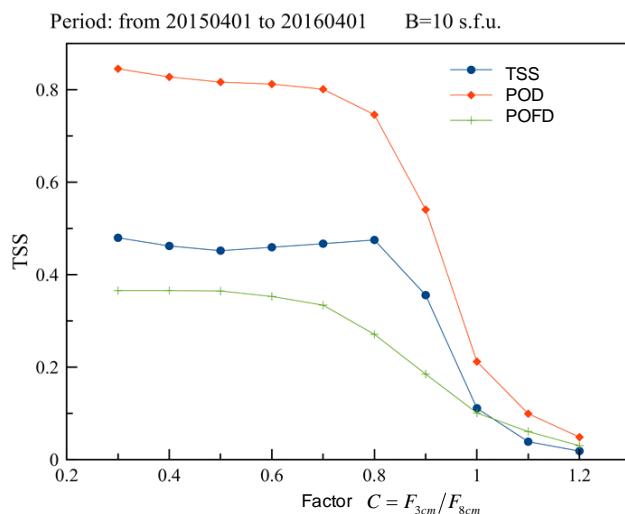


Рисунок 7 – Зависимость индекса TSS и его составляющих POD и POFD от параметра C при значении параметра B=10 s.f.u.

На рис.7 приведен ход кривых индекса TSS для интервала наблюдений с 1 апреля 2015г. по 1 апреля 2016г.

Таким образом, на рис.7 отдельно представлены зависимость TSS (средняя кривая), зависимость POD (верхняя кривая) и зависимость POFD (нижняя кривая).

Это позволяет разделить вероятности обнаружения вспышки POD и вероятности ошибки обнаружения вспышки по всем ложным событиям POFD. Из рис.23 видно, что вероятность обнаружения вспышки POD довольно высока при значениях $C = F_{3cm}/F_{8cm} < 0.8$ и даже показывает рост с уменьшением фактора C.

Это указывает что фактор С представляет собой уровень отсечки вспышечных событий, предвспышечное уярение которых происходило при значениях $C = F_{3cm}/F_{8cm} = 0.3-0.8$. В дальнейшем при больших значениях $C>0.8$ учитывались только области с большим уровнем минимального потока, что резко уменьшало значение POD. Фактор POFD как вероятность ошибки обнаружения вспышки показывает подобный ход кривой, но на меньшем уровне значений.

Возможные причины ошибок:

- Неточное автоматизированное отождествление активных областей на диске Солнца и на радиоскане Солнца, что влияет на число неучтенных событий.
- совпадение (двух или более) АО в одномерной вертикальной диаграмме радиотелескопа,
- ошибки автоматического определения границ АО - ошибки идентификации АО с NOAA AR при положении АО на краю диска, где точность снижается из-за угла проекции.
- проведение радионаблюдений в ходе активного события (всплеска, коронального выброса масс и др.).

Для данных наблюдений одногодового интервала получено:

ACC 66-80%, TSS 13-24% , POD 13-56%, POFD 5-56%

Для данных наблюдений двухгодового интервала получено:

ACC 58-79%, TSS 10-43% , POD 20-86%, POFD 9-46%

Это указывает на существование большого количества возможных модифицированных прогнозов при выборе параметров В и С. С другой стороны, есть указание на существование влияния хода активности 11-летнего цикла на оценку достоверности критерия прогнозирования. С другой стороны, поиск оптимального критерия возможен при оптимизации выбора частот сравнения потоков радиоизлучения. Вероятно, что на уменьшение величины POD влияют другие версии предвспышечного проявления не совпадающие с принятыми в данной работе расчетами.

Выводы

Проведено исследование эффективности радиоастрономического критерия прогноза солнечной активности Танаки-Эноме.

Исследованы зависимости статистических критериев ACC (точность) и TSS (ошибки) от уровня минимального излучения F_{3cm}^{\min} и от отношения потоков F_{3cm}/F_{8cm} .

Продемонстрировано, что существует резервы повышения достоверности прогноза как за счет уменьшения F^{\min} , так и за счет изменения длины волны.

Для улучшения процесса отождествления АО по оптическим и по радиоданным, необходимо повышать точность автоматического отождествления и чувствительность метода на коротких волнах.

Результаты проведенного исследования показывают, что критерий ТЭ по-разному работает в разных по длительности интервалах (на примере годичного и двухгодичного набора данных). Это указывает также на различную его эффективность на протяжении всего 11-летнего цикла и от цикла к циклу.

Таким образом, возникают рекомендации о создании в будущем адаптивного критерия, в котором автоматически вычислялись бы параметры В, С, ACC, TSS, с использованием оптимального набора частотных пар из перечня частот многоволнового спектрального комплекса РАТАН-600. Улучшение адаптации модернизированных критериев прогноза можно реализовывать методом наименьших квадратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богод В.М., Алесин А. М., Перваков А. А., РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600 В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ. II. МНОГООКТАВНЫЙ СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ РАТАН-600 ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ, Редакция журнала "Астрофизический бюллетень", САО РАН, пос. Нижний Архыз, Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская Республика, 369167 2011 г., том 66, №2, с. 223–233

2. Тохчукова С. Х., РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600 В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ. IV. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА РАТАН-600. АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ, Редакция журнала "Астрофизический бюллетень", САО РАН, пос. Нижний Архыз, Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская Республика, 369167, 2011 г., том 66, №3, с. 409–419

3. McIntosh. P. The classification of sunspot group, Solar Physics (ISSN 0038-0938), vol. 125, Feb. 1990, p. 251-267
4. H.Tanaka and S._Enome, The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares,/ Solar Physics, **V. 40**, P. 123 (1975).
5. Bloomfield S., Higgins P.A., McAteer R.T.J., Gallagher P.T. Towards reliable benchmarking of solar flare forecasting methods. // The Astrophysical Journal Letters. V. 747. I. 2. L. 41. DOI: 10.1088/2041-8205/747/2/L41. 2012.
6. С.В. Балдин, В. И. Гараимов, РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600 В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ. III. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ НА РАТАН-600 АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ, Редакция журнала "Астрофизический бюллетень", САО РАН, пос. Нижний Архыз, Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская Республика, 369167, 2011 г., том 66, №3, с. 400–408

Эркенов Артур Курманбиеевич, Сотникова Юлия Владимировна

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600, ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Аннотация. В работе представлена разработанная на РАТАН-600 и введенная в штатную эксплуатацию автоматизированная система оценки параметров радиоисточников, наблюдаемых на всех имеющихся радиометрах континуума (два приемных комплекса вторичных зеркал №1 и №2 с общим числом радиометров - 30). Система также применяется для мониторинга параметров антенных и приемных систем радиотелескопа РАТАН-600, который проводится с использованием текущих измерений калибровочных радиоисточников.

Ключевые слова: радиоконтинуум, методы, каталоги, радиоисточники.

Annotation. We present the automated system for estimating the parameters of radio sources observed on all available continuum radiometers (two receiving complexes of secondary mirrors No. 1 and No. 2 with a total of 30 radiometers) developed at RATAN-600 radio telescope and put into normal operation. The system is also used for the monitoring of the parameters of the antenna and receiving systems of RATAN-600 radio telescope, which is carried out using current measurements of calibration radio sources.

Keywords: radio continuum, methods, catalogs, radio sources.

Введение

РАТАН-600 – радиотелескоп рефлекторного типа с кольцевой антенной с диаметром 600 м, основной в России, работающий в центральном «окне прозрачности» Земной атмосферы в диапазоне длин волн 1-50 см [1-2]. Особенности его геометрии позволяют за счет поперечных aberrаций при малых потерях сигнала получать радиоспектр источника в течение одного наблюдения (1–2 минуты), что важно при исследованиях переменных источников. Современный уровень приемной аппаратуры обеспечивается сверхмалошумящими усилителями на транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT) и цифровыми сигнальными процессорами в системе регистрации данных. РАТАН создавался как инструмент с ручным управлением с относительно небольшой загрузкой (10-20 объектов в сутки). Ряд мероприятий по автоматизации телескопа в 80-е и 90-е гг. привел к загрузке телескопа, достигающей сотни объектов в сутки на каждом секторе. Все это привело не только возникновению новых наблюдательных задач и лавинообразным увеличением количества известных радиоисточников, но и развитием новых технологий управления распределенных систем, а также приема и измерения радиосигналов.

Наблюдения на телескопе проводятся одновременно в двух- и трехзеркальной конфигурациях, перекрывая широкий диапазон склонений исследуемых объектов - от +80° до -40°. При этом возможно получать наблюдательный материал для больших списков объектов (до 200 в сутки), оценивать и отбирать наиболее перспективные для исследований. Регулярно проводится мониторинг радиоисточников нестационарного радиоизлучения. В результате накоплен многочастотный материал на длительных временных масштабах, например [3-10], и актуальной становится задача оперативной обработки наблюдательного материала. На протяжении 40 лет работы радиотелескопа уже создавались программы обработки наблюдательных данных континуума для упрощения процедуры оценок плотностей потоков. Во всех из них используются общепринятые методы обработки цифрового сигнала с разной степенью автоматизации и проработки пользовательского интерфейса [11-12].

Актуальность решаемой задачи своевременной обработки и представления наблюдательного материала определяется и большим объемом данных, и необходимостью оперативно получать информацию о состоянии объектов. Так, при исследованиях АЯГ непрерывно используются два рабочих приемных комплекса вторичных зеркал №1 и №2 (девять радиометров). При среднем количестве наблюдений, равном 150 в сутки, суммарное число записей в месяц составляет 40.5

тысяч. Ручная обработка такого объема данных не представляется возможной. Кроме того, необходимо оперативно (ежедневно) получать информацию о спектральном поведении большого числа радиоисточников для быстрой оценки их параметров и текущего состояния систем радиотелескопа. В работе описана общая характеристика системы и структура программного обеспечения, алгоритмы получения антенных температур и спектральных плотностей потоков, приведены соотношения для ошибок измерений, представлена реализация контроля параметров антенных и приемных систем.

Общая характеристика системы обработки

Система представляет собой комплекс программного обеспечения (ПО), объединяющий программные компоненты штатного пакета обработки наблюдений РАТАН-600 в среде Linux – FADPS [11], а также программное обеспечение, разработанное авторами. Алгоритмы обработки данных реализованы на языках С и С++. В системе использована СУБД MySQL для универсальности доступа ко всем данным, как исходным, так и появляющимся в процессе обработки наблюдений, а также для хранения конфигурации системы, информации о калибровочных объектах, характеристик радиотелескопа и радиометров, хранения полученных результатов. Связь системы обработки с СУБД организована с использованием языка PHP. Для взаимодействия с системой пользователю предоставлен разработанный нами веб-интерфейс.

В процессе обработки наблюдатель задает входной массив данных, а также контролирует все последующие этапы обработки: оценку качества наблюдательного материала, оценки параметров калибровочных радиоисточников, получение калибровочных характеристик радиотелескопа и оценки параметров исследуемых объектов. Реализована возможность активно вмешиваться в ход обработки на любом этапе при возникновении проблем, связанных, например, с качеством данных или изменившимися параметрами радиотелескопа. Конечный результат в виде спектров, кривых блеска и значений плотностей потоков может сохраняться в нескольких текстовых и графических форматах, а также экспортirоваться и автоматически загружаться в интерактивный каталог BLcat [13]. Анализ и обработка наблюдательного сета длительностью в один месяц до получения окончательных результатов занимает около 20 минут.

Структура программного обеспечения системы

Для реализации обработки была выбрана архитектура «клиент–сервер». При этом вся обработка инициируется пользователем на клиентской стороне через веб-интерфейс и выполняется на стороне сервера. Таким образом, специализированное ПО для клиентского компьютера полностью отсутствует (необходим только веб-браузер). Такая архитектура позволяет реализовать централизованное сопровождение ПО на сервере. В случае необходимости в роли и клиента, и сервера может выступать один и тот же компьютер. Основным ядром сервера системы является набор PHP-модулей, которые активируются пользователем через веб-интерфейс и выполняют все задачи, связанные с процедурой обработки: запуск внешних программ обработки сигналов, взаимодействие с пользователем через Apache-сервер (визуализация процесса обработки и представления результатов), взаимодействие с базой данных системы через MySQL-сервер. Встроенная в систему база данных содержит:

- «Входной набор данных» - список радиоисточников, подлежащих обработке в текущем сеансе; хранит всю информацию, полученную из FITS-заголовков входных файлов; ключевым полем таблицы являются уникальные имена источников, определяемые координатами и датой наблюдений;

- «Известные радиоисточники» - физические параметры радиоастрономических объектов базы данных системы: координаты, альтернативное имя, красное смещение, тип объекта и другая информация из литературы; система идентифицирует объекты «входного набора данных» с объектами этой таблицы по координатам с окном 30x30 секунд по прямому восхождению и склонению;

- «Параметры калибровочных объектов»;
- «Параметры антенны и радиометров»;

- «Служебные константы», используемые при реализации алгоритмов обработки: значения рабочих окон записей, окон вычитания линейного и нелинейного фона и др.

Собственно обработка наблюдательных данных производится ядром системы в блоке «Stages of reduction». Все этапы обработки более подробно описаны в последующих разделах.

Последовательность этапов обработки данных

4.1. Определение входного набора данных

Первым этапом подготовки к обработке является создание входного набора данных - списка объектов на заданном интервале дат и времени с учетом конфигурации антенны (заданный сектор радиотелескопа и номер вторичного зеркала). При создании этого массива, как правило, учитывается имя автора наблюдательной программы, а также требуемый частотный диапазон наблюдений.

При автоматизации процесса обработки наблюдений первый этап является самым трудоемким, поскольку одна из задач системы - обработка любых данных цифрового архива РАТАН-600, накопленного за более чем 30 лет наблюдений. На таком длительном интервале времени архив не является однородным, и требуется учитывать так называемые «исторические данные»:

- развитие регистрационного (архивного) формата данных: добавление новых необходимых параметров в информационных заголовках архивных файлов;

- несколько этапов модернизации систем регистрации данных, которые отражают изменения в идеологии регистрации и в архитектуре самих радиометров континуума;

- различия в координатно-временной привязке наблюдений.

Поэтому первый этап включает в себя не только формирование заданного списка объектов, но и предварительную подготовку наблюдательного материала к обработке, в результате которой формируется однородный по параметрам и структуре массив. Остановимся подробнее на перечисленных выше факторах.

Форматы данных радиометров континуума

В начале 90-х годов основным выходным форматом систем регистрации данных комплексов радиометров континуума стал RFLEX-формат, по своей структуре близкий к FITS-формату. Аббревиатура RFLEX означает RATAN-FLEX, где FLEX (FLexible EXchange) - формат гибкого обмена данными. RFLEX является «многочастотным» (или многоканальным) форматом, когда в одном файле хранятся данные, полученные на разных радиометрах (всех или некоторых) конкретного радиометрического комплекса. Наблюдательные записи предыдущих лет (80-х и начала 90-х годов), хранимые в т.н. R-формате, были преобразованы в RFLEX-формат. RFLEX-формат разрабатывался для хранения и передачи данных, но не предназначался для их обработки.

В процессе обработки сигналов, полученных от всех радиометров, требуется последовательная работа с одномерными временными рядами, которые соответствуют сигналам с выходов детекторов каждого радиометра. Для обработки данных был введен так называемый F-формат [14], который является подмножеством FITS-формата данных и представляет собой одномерный массив (временной ряд), соответствующий одному наблюдению на одной длине волны одним радиометром (в отличие от «многочастотного» RFLEX-формата данных). В системе FADPS существует программа перекодировки из RFLEX-формата в F-формат данных (программа fl2f). Параметрически текущая версия F-формата полностью согласована с соответствующей версией RFLEX-формата.

Изменения в регистрации данных и в радиометрах

Изменения в схемах построения радиометров привели к изменению систем регистрации, в результате чего архивный RFLEX-формат с 2010 г. Хранит сигналы радиометров в измененной форме, отличной от более ранних способов представления. Если ранее одному выходу радиометра (одному детектору) соответствовал один одномерный временной ряд, то сейчас одному детектору соответствует два одномерных временных ряда (сигнала). Каждый из этих двух сигналов соответствует одному из полупериодов модуляции радиометра, условно названных сигналами «а»

(antenna) и «е» (equivalent), как описано в работе [15]. Для построения окончательного сигнала радиометра требуется выполнить его синтез, который заключается в получении либо разностного сигнала $a-e$ (если радиометр модуляционный), либо сигнала $(a+e)/2$ (если это «радиометр полной мощности»). Информация об архитектуре радиометра хранится в RFLEX-подзаголовке соответствующего сигнала.

Время и координаты

Эфемериды наблюдаемых радиоисточников исторически рассчитывались разными авторами наблюдательных программ на различные астрономические эпохи. Для работы в единой системе координат нами принято решение автоматически привести все данные к одной эпохе (нами выбрана эпоха J2000) путем пересчета координат источника штатной программой пакета FADPS.

Подготовка исходных данных к обработке

Исходя из перечисленных выше факторов, связанных с первым этапом обработки, автоматизированные выбор и подготовка данных к обработке выглядят следующим образом:

- выборка данных из цифрового архива радиометров континуума РАТАН-600 согласно списку критериев: интервал “дата-время”, автор наблюдательной программы, конфигурация антенны и приемных комплексов;
- приведение всех данных к последней версии RFLEX-формата с заполнением всех новых полей в информационных заголовках RFLEX-файлов;
- распаковка многочастотных архивных данных: получение из каждого RFLEX-файла, содержащего N одномерных сигналов, N файлов F-формата, каждый из которых содержит один одномерный сигнал;
- синтез выходных сигналов радиометров согласно архитектуре последних;
- пересчет координат и привязка временной шкалы на эпоху J2000 для всех объектов.

В результате создания исходного набора данных в базе системы автоматически заполняются таблицы, где каждая строка содержит все параметры из заголовков F-файлов (описывает полностью наблюдение на данной длине волны данным радиометром), а также имена директорий на диске компьютера, где физически хранятся исходные данные и будут храниться промежуточные и окончательные результаты обработки. Также на этом этапе подготовки к обработке в базе данных системы заполняются таблицы, относящиеся к наблюдаемым радиоисточникам, и автоматически производится идентификация радиоисточников по координатам с таблицей «Известные радиоисточники». Формируется список калибровочных радиоисточников, которые наблюдались в программе. На этом этапе есть возможность ручной коррекции списка исследуемых объектов. Массив готов к следующему этапу автоматизированной обработки.

Измерение параметров радиоисточников

Исходный набор данных содержит два логических подмножества: калибровочные радиоисточники и исследуемые объекты. Задача дальнейшей обработки сводится к получению одних и тех же параметров для этих двух подмножеств объектов: амплитуды и полуширины гауссова отклика неподвижного радиотелескопа на прохождение радиоисточника через диаграмму направленности (ДН). Массивы этих двух подмножеств поочередно направляются на одну и ту же автоматическую процедуру оценки указанных параметров. На этом этапе производится ряд стандартных для РАТАН-600 процедур обработки наблюдений: выделение участка записи, содержащего радиоисточник (далее работа производится только с ним), вычитание на выбранном участке линейного тренда, а также фоновой кривой более высокого порядка (больше 2). Как упоминалось выше, отклик радиотелескопа на прохождение компактного радиоисточника через неподвижную ДН является гауссовым, поэтому следующий шаг автоматической обработки - это аппроксимация зашумленной кривой прохождения радиоисточника гауссианой методом наименьших квадратов. Однако исходные записи содержат белую шумовую компоненту в диапазоне частот $0 - F_{\max}$. Для систем регистрации радиометров континуума РАТАН-600 [15] частота F_{\max} примерно равна 9 Гц. В то же время Фурье-спектр гауссова отклика на прохождение

источника через неподвижную ДН локализован в диапазоне 0–1.5 Гц (ширина этого спектра обратно пропорциональна длине волны). При обработке необходимо устраниć избыточный шум для максимизации отношения сигнал/шум, что достигается путем применения фильтра нижних частот (ФНЧ). В нашей системе обработки в качестве такого ФНЧ применен разработанный нами цифровой фильтр с бесконечной импульсной характеристикой на основе фильтра Баттервортса с нулевой фазовой характеристикой [15]. Удобство применения данного фильтра состоит в том, что его входными параметрами являются частота среза и порядок. При таком подходе требуемые параметры фильтра синтезируются «на лету» в начале его работы. Это позволяет менять частоту среза фильтра, поскольку она должна быть согласована с максимальной частотой в спектре радиоисточника при наблюдении на заданной высоте и на данной длине волны. Порядок фильтра выбран нами равным 8, что обеспечивает достаточную крутизну характеристики. Свойство нулевой фазовой характеристики ФНЧ обеспечивается путем двухкратной фильтрации сигнала фильтром вдвое меньшего порядка, причем перед вторым шагом фильтрации производится «обращение времени» массива данных. Нулевая фазовая характеристика ФНЧ приводит к тому, что отклик от радиоисточника в результате фильтрации не искажается и не смешается по оси времени.

После НЧ-фильтрации производится аппроксимация отклика на источник гауссианой. В результате для всех объектов получены искомые оценки параметров: амплитуды (антенной температуры $T_{a,v}$ на частоте v) и полуширины гауссова отклика на данной длине волны $\phi_{ix,v}$ (здесь «*i*» означает *investigated source*, а индекс x говорит о том, что сечение источника диаграммой направленности производится вдоль горизонтальной координаты x). Все полученные на данном этапе обработки оценки параметров источников заносятся в базу данных системы для использования их на следующем этапе обработки - калибровке измерений по спектральной плотности потока. Программное обеспечение, разработанное авторами для данного этапа обработки, автоматизирует процесс вызова необходимых методов и подготовки входных данных для них, а также хранение всех промежуточных и выходных результатов. Если пользователю требуется визуально контролировать процесс обработки, графический интерфейс отображает всю необходимую информацию: таблицы с оценками параметров радиоисточников, исходные и обработанные сигналы радиоисточников.

Все методы в блоке «Data reduction sequence,» за исключением НЧ-фильтрации, реализованы в системе FADPS и протестированы наблюдателями РАТАН-600 в течение более 15 лет. Разработанный нами НЧ-фильтр уже более пяти лет применяется также в составе ПО-систем регистрации данных РАТАН-600 [15].

Оценки спектральных плотностей потоков. Ошибки измерений

Дальнейший этап - калибровка амплитуды исследуемых объектов по плотности потока излучения на основании полученных оценок для калибровочных радиоисточников. Стандартная процедура оценки спектральной плотности потока описана подробно в работах [3, 9, 16, 17]. Список калибровочных объектов, значения плотностей потоков, поправки на линейную поляризацию и угловой размер хранятся в базе данных системы: имя источника, имя по координатам RA и DEC (эпоха 2000.0), принятые значения плотностей потоков на соответствующих частотах. В работе используется абсолютная шкала потоков [18-20], ее ошибки составляют 10% на 21.7 ГГц и 3–5% на остальных частотах РАТАН-600. Данные о линейной поляризации взяты из работы [21]. Калибровка измерений и оценка спектральных плотностей потоков производятся стандартными методами [3, 9, 16, 17] с учетом угловых размеров и поляризации калибровочных стандартов.

Суммарная погрешность измерений учитывает погрешность определения антенной температуры в результате аппроксимации кривой прохождения гауссианой, ошибку оценки калибровочной кривой, ошибку определения антенной температуры по эталонному источнику шумовой мощности в радиометре. Итоговая относительная среднеквадратичная ошибка измерения спектральной плотности потока исследуемых объектов 5–20% на 11.2, 7.7 и 4.8 ГГц и 10–25% на 1.1, 2.3 и 21.7 ГГц. В случае использования алгоритмов векторного осреднения записей радиоисточника для повышения отношения сигнал/шум ошибка уменьшается в корень квадратный из числа усредняемых записей.

Оценка параметров антенной и приемных систем

Система обработки предоставляет информацию о параметрах антенной системы, таких как полуширина главного лепестка ДН, изменение эффективной площади $A_{\text{eff},v}$ со временем и параметры радиометрического комплекса. Для измерений параметров антенной системы используются наблюдения двенадцати стандартных точечных калибровочных объектов. Ежедневные измерения калибровочных объектов позволяют своевременно обнаруживать отклонение экспериментальных значений указанных величин от расчетных на каждой высоте. Для этого полученные полуширины объектов сравниваются с рассчитанными теоретически. Теоретическая кривая полуширина получена с использованием набора расчетных диаграмм направленности методом, описанным в работе [22]. Также система обработки графически представляет нормированные значения сигнала калибровки и среднего уровня сигнала для каждого из радиометров полной мощности, что позволяет оперативно реагировать на возможные неисправности в радиометрах [23].

Форматы и экспорт получаемых данных

Система поддерживает разнообразные форматы экспорта, что является оптимальным и удобным при переносе на другой ПК:

- 1) экспорт и копия всей системной базы;
- 2) экспорт одного или нескольких наблюдательных циклов;

2) экспорт результата обработки в специализированном формате для последующего импорта в базу интерактивного каталога “Многочастотные измерения объектов типа BL Lacertae на РАТАН-600” (www.sao.ru/blcat/) [13]. При этом реализуется согласование имен объектов в базе программы и базе каталога, которое автоматически вводит новые объекты в список каталога BLcat.

Актуальным является вопрос о формате результатов обработки, который должен быть представлен в разнообразных видах для последующего анализа другими программными средствами. Программа позволяет автоматически представлять данные для: модуля *spg* пакета FADPS [11], работающего с континуальными спектрами и вычисляющего его основные параметры; для графического представления спектров, кривых блеска, калибровочных зависимостей, кривых полуширин прохождений источника и пр. в *gnuplot* (*ps, *eps, *jpg и др.); для набора макрорасширений системы компьютерной верстки *latex*.

Результаты

Представленная система обработки [23] радиоастрономических наблюдений прошла успешную апробацию [13, 24-27]. Впервые автоматизирована полная процедура обработки наблюдений компактных объектов, включающая: расчет калибровочных зависимостей на всех длинах волн; измерение спектральных плотностей потоков радиоисточников на нескольких частотах одновременно, построение кривых блеска; построение радиоспектров источников; измерение основных параметров радиотелескопа: изменения эффективной площади $A_{\text{eff},v}$ и ширины главного лепестка ДН антенны ϕ_{F_x} ; оценку основных параметров качества радиометров континуума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korolkov D.V. and Pariiskii Yu.N., *Sky Telescope*, 1979, 57, p. 324.
2. Parijskij Y.N., *IEEE Antennas Propagation Magazine*, 1993, 35, p. 7.
3. Mingaliev M.G., Sotnikova Y.V., Bursov N.N., et al., *Astronomy Reports*, 2007, 51, p. 343-363.
4. Mingaliev M.G., Sotnikova Y.V., Kardashev N.S., and Larionov M.G., *Astronomy Reports*, 2009, 53, p. 487-500.
5. Mingaliev M.G., Sotnikova Y.V., Larionov M.G., and Erkenov A.K., *Astronomy Reports*, 2011, 55, p. 187-192.
6. Ade P.A.R. et al. (Planck Collab.), *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 536, A15.
7. Ade P.A.R. et al. (Planck Collab.), *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 536, A18.
8. Giommi P., Polenta G., Lahteenmaki A., et al., *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 541, A160.

9. Mingaliev M.G., Sotnikova Y.V., Torniainen I., et al., *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 544, A25.
10. Mingaliev M.G., Sotnikova Y.V., Mufakharov T.V., et al., *Astrophysical Bulletin*, 2013 68, p. 262-272.
11. Verkhodanov O.V., *ASP Conf. Ser.*, 1997, 125, p. 46.
12. Kovalev Y.A., Doctoral Dissertation in Mathematics and Physics, Physical Inst. RAS, Moscow, 2003.
13. Mingaliev M.G., Sotnikova Y.V., Udovitskiy R.Y., et al., *Astronomy & Astrophysics*, 2014, 572, A59.
14. Verkhodanov O.V., Erukhimov B.L., Zhelenkova O.P., et al., Report № 200, 1990, Nizhnij Arkhyz.
15. Tsybulev P.G., *Astrophysical Bulletin*, 2011, 66, p. 109-122.
16. Алиакберов К.Д., Mingaliev М.Г., Наугольная М.Н., и др., *Астрофизические исследования*, 1985, 19, с. 60-65.
17. Mingaliev M.G., Stolyarov V.A., Davies R.D., et al., *Astronomy and Astrophysics*, 2001, 370, p. 78.
18. Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., et al., *Astronomy and Astrophysics*, 1994, 284, p. 331-339.
19. Baars J.W.M., Genzel R., Pauliny-Toth I.I.K., and Witzel A., *Astronomy and Astrophysics*, 1977, 61, p. 99-106.
20. Perley R.A. and Butler B.J., *Astrophysical Journal Supplemen*, 2013, 204, p. 20.
21. Tabara H. and Inoue M., *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1980, 39, p. 379-393.
22. Коржавин А.Н., *Астрофизические исследования*, 1977, 9, с. 71.
23. Udovitskiy R.Yu., Sotnikova Yu.V., Mingaliev M.G., et al., *Astrophysical Bulletin*, 2016, 71, p. 496-505.
24. Mufakharov T.V., Mingaliev M.G. Sotnikova Yu.V., et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 450, p.2658-2669.
25. Mingaliev M. G., Sotnikova Yu.V., Mufakharov T.V., et al., *Astrophysical Bulletin*, 2015, 70, pp.264-272.
26. Lähteenmäki A., Järvelä E., Hovatta T., et al., *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 603, id.A100, 26 pp.
27. Planck Collaboration: Ade P.A.R., Aghanim N., Aller H.D., et al., *Astronomy & Astrophysic* 2016, 596, id.A106, 37 pp.

*Юшкин Максим Владимирович, Панчук Владимир Евгеньевич, Фатхуллин Тимур Амирович,
Верич Юрий Борисович, Якопов Григорий Владимирович*

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В НАЗЕМНЫХ И ОРБИТАЛЬНЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Аннотация. Приводится описание методов создания математических моделей приборов, предназначенных для спектрального анализа слабых сигналов от космических источников, и систем контроля состояния спектрографов в режиме реального времени. Показаны примеры построения математических моделей аппаратуры в наземных и космических экспериментах на этапе проектирования, а также показано влияние результатов моделирования на сам процесс разработки новой спектральной аппаратуры.

Ключевые слова: космос, математическое моделирование, экзопланеты.

Введение

Методы математического моделирования широко используются при создании спектральной аппаратуры, в том числе и для астрофизических задач. Как правило, это расчет оптических схем приборов для определения оптимальных параметров оптических элементов и допусков на их изготовление. Реже встречаются попытки смоделировать отдельные варианты наблюдений на уже существующих приборах с целью оптимизировать данный спектрограф для какой-либо новой наблюдательной задачи или попытки учесть дефекты приборов на этапе накопления и обработки наблюдательных данных.

Так, например, для уменьшения потерь света на входе в спектрограф скрещенной дисперсии Англо-Австралийского Телескопа (AAT) диаметром 3.9 метра были смоделированы варианты перезаполнения диспергирующего элемента путем подстройки геометрии входа в спектрограф [1,2]. Это позволило увеличить световую эффективность прибора без потери спектрального разрешения.

На спектрографе скрещенной дисперсии 3-метрового телескопа Ликской обсерватории был разработан новый метод моделирования инструментального профиля, варьирующегося по кадру спектрального изображения, что привело к существенному увеличению точности определения лучевых скоростей в задаче поиска первых экзопланет [3].

Математическая модель спектрографа UVES на 8-метровом телескопе VLT Европейской Южной Обсерватории (ESO) была использована для разработки алгоритмов оптимальной экстракции спектров [4]. Эта модель была предварительно отработана на спектрографе CASPEC 3.6-метрового телескопа ESO.

И, наконец, пример использования математических моделей спектральной аппаратуры в орбитальных астрофизических экспериментах. После установки на космический телескоп Хаббла нового спектрографа COS (Cosmic Origin Spectrograph) обнаружились рассогласования наземных и орбитальных калибровок. Была построена математическая модель прибора, с учетом ранее созданной модели телескопа [5], и определены смещения оптических элементов спектрографа. Далее модель COS с учетом разьюстировок использовалась в системе обработки наблюдательных данных [6].

Предлагаемый нами подход к моделированию спектральной аппаратуры затрагивает не только этапы проектных и конструкторских работ по созданию прибора, но и этапы эксплуатации и обработки наблюдательных данных. Создаваемая нами на этапе проектирования нового спектрографа математическая модель позволяет получать изображения спектров с данного прибора в виде, пригодном для обработки и анализа стандартными средствами редукции астрономических данных, еще до начала изготовления отдельных элементов. Информация о количественных характеристиках спектрального изображения позволяет приступить к созданию автоматической системы обработки наблюдательных данных еще до ввода спектрографа в эксплуатацию, что является немаловажным для космических экспериментов. Нами созданы модели спектральной

аппаратуры космической обсерватории «Спектр-УФ», которые позволили полностью отказаться от сложной системы механической активной стабилизации приборов, уменьшающей их надежность. Модели опробованы на работающем наземном спектрографе НЭС 6-метрового телескопа БТА. Также нами смоделированы способы оперативного контроля состояния спектральной аппаратуры, что позволяет, как подстраивать прибор во время наблюдений, так и учитывать его меняющиеся характеристики на этапе сбора и обработки наблюдательных данных.

Метод построения математической модели.

Подробное описание математической модели приведено в работе [7]. Здесь кратко остановимся на основных этапах моделирования спектральной аппаратуры.

Расчет и оптимизация формы поверхностей оптических элементов выполнялись с использованием пакета Zemax. Уравнения поверхностей, полученные в Zemax, использовались в качестве входных параметров для нашего комплекса программ.

Далее генерируется пучок лучей на входном зрачке телескопа, представляющий собой многомерный массив. Каждый луч в общем случае описывается семью параметрами: тремя координатами на входном зрачке, тремя направляющими косинусами, задающими направление луча, и длиной волны. Распределение лучей по координатам на входном зрачке оптической схемы может быть случайным или задаваться по определенному закону (в виде концентрических кругов или равномерной прямоугольной сетки). Направляющие косинусы всех лучей в случае моделирования космической аппаратуры задаются одинаковыми, эмитируя плоский волновой фронт. При моделировании наземной аппаратуры для симуляции воздействия земной атмосферы и расчета потерь на входной щели спектрографа направляющие косинусы входных лучей имеют случайное распределение с дисперсией, соответствующей задаваемому качеству изображения.

После этого методом трассировки лучей, описанного в работе [8], проводится расчет прохождения светового пучка через все оптические элементы и вычисляются координаты пересечения лучей с плоскостью светоприемника. На этом этапе определяется виньетирование на каждом оптическом элементе, т.е. проводится учет количества лучей до и после того или иного оптического элемента.

На заключительном этапе выполняется процедура «пикселизации» изображения с учетом полной энергетической эффективности оптической схемы и виньетирования на каждом оптическом элементе. Для более эффективного использования алгоритмов параллельных вычислений и уменьшения времени полного обсчета оптической системы мы генерируем одинаковое количество лучей для каждой длины волны на входе. Спектральное распределение энергии источника излучения учитывается при расчете окончательного изображения. Для моделирования изображений звездных спектров мы используем синтетические спектры с заданными фундаментальными параметрами (эффективная температура, ускорение силы тяжести на поверхности звезды, макро и микротурбулентные скорости, химический состав). Расчет синтетических звездных спектров проводится с заведомо большим спектральным разрешением в сравнении с моделируемым спектральным прибором. Справедливости ради нужно заметить, что для корректного моделирования фотонного шума необходимо генерировать монохроматические пучки на входе оптической схемы с количеством лучей пропорциональным интенсивности излучения объекта на данной длине волны. Однако решение этой задачи, как и задачи моделирования следов космических частиц с учетом бюджета электронов и протонов различных энергий на геосинхронной орбите, мы рассматриваем в качестве дальнейшего развития нашего комплекса программ.

Расчет полной энергетической эффективности оптической схемы делится на два, в принципе, независимых этапа. Первый – вычисление потерь за счет отражений, рефракции на оптических поверхностях и потерь на приемнике излучения. Второй – расчет энергетической эффективности дифракционных решеток. Первый этап состоит из простого перемножения кривых эффективности каждой оптической поверхности на данной длине волны. Второй же этап требует подробного описания. Модельный, приближенный к реально изготавливаемым устройствам, расчет энергетической эффективности как нарезных, так и объемно-фазированных голограмических решеток задача, вообще говоря, многопараметрическая и требующая значительных

вычислительных мощностей. По-видимому, наиболее реалистичные расчеты возможно проводить в рамках теории электромагнитного поля, то есть, прямым решением уравнений Максвелла с учетом реальной функции штриха (его формы и отклонения от идеальной), поляризации падающего излучения, конечности диэлектрической постоянной и т.п. (см., например, [9]). В своей модели мы использовали приближение геометрической оптики. Как правило, в звездной спектроскопии для получения высокого спектрального разрешения используются дифракционные эшелле-решетки, ширина штриха которых более чем на порядок превышает длину волн падающего излучения. Поэтому в нашем случае использование скалярной теории дифракционных решеток может быть оправданным. Следует отметить, что отработку своих алгоритмов моделирования спектральной аппаратуры мы проводили на наземных приборах [7]. Результаты такого моделирования показали хорошее согласие рассчитанных спектров с реально наблюдаемыми. Однако при моделировании эшелле-решеток с плотностью штрихов меньше 66 штр/мм мы столкнулись с некоторой технологической особенностью нарезки дифракционных решеток. Оказалось, что при нарезке решеток с большим углом блеска и большим периодом для уменьшения давления на резец, штрихи нарезаются не на полную глубину, а с некоторыми промежутками, что приводит к снижению общей эффективности. Эта особенность становится заметной при расчете функции блеска дифракционной решетки, поэтому, для согласования теоретических спектров с реальными мы ввели эффективную ширину штриха, равную отношению реальной ширины рабочей поверхности штриха дифракционной решетки к теоретической, рассчитанной исходя из периода решетки и угла блеска. Так для R2 решетки с плотностью штрихов 37.5 штр/мм, эффективная ширина штриха получилась равной 0.6.

Программная реализация модели выполнена на языке C++ с использованием технологии Nvidia CUDA. Программный комплекс состоит из трех отдельных модулей: трассировка лучей, расчет эффективности и моделирование выходного ПЗС-кадра. В качестве входных данных для первого модуля используется описание оптической схемы прибора. Оно содержит проектные параметры оптических поверхностей: тип поверхности (зеркало, линза, дифракционная решетка, входная диафрагма и т.п.), класс поверхности (коническая или в форме тора), радиус (или радиусы для поверхностей класса тор) кривизны, квадрат эксцентриситета и возможные коэффициенты полинома для асферических поверхностей, расстояния между вершинами поверхностей, их углы поворота вокруг осей координатной системы и габаритные размеры, параметры дифракционных решеток. Также в качестве начальных данных выступают параметры входного пучка: количество лучей, размер, координаты и направляющие косинусы каждого луча в опорной системе и их длины волн, диапазон абсолютных номеров рабочих эшелле порядков. Выходными данными этого модуля являются координаты и длины волн прошедших оптическую схему лучей на последней поверхности (обычно на приемнике). Второй модуль также использует описание оптической схемы, но, входными данными являются только параметры решеток, кривые эффективности отражения или пропускания покрытий, квантовой эффективности приемника. Третий в качестве входных данных требует результаты трассировки лучей (выходные данные первого модуля), полную эффективность прибора (выходные данные второго модуля) и параметры ПЗС-приемника: его габаритные размеры, размер пикселя и тип входного спектра. Входным спектром могут выступать чернотельный с параметром абсолютной температуры, линейчатый (генерируется набор линий случайной длины волны и ширины в заданных диапазонах) и пользовательский спектр, который может быть как, например, наблюдаемым или модельным. Результатом вычислений третьего модуля является файл в стандарте FITS (Flexible Image Transport System) с двумерным изображением модельного спектра.

Проверка модели на действующем приборе.

Работы по моделированию спектральной аппаратуры нами были начаты в рамках проекта космической обсерватории «Спектр-УФ», предназначенный в том числе и для спектроскопии с высоким разрешением в ближнем и вакуумном ультрафиолете. Для отработки своих алгоритмов мы построили модель эшелле-спектрографа НЭС [10], работающим в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. Оптика НЭС позволяет работать в наземном УФ-диапазоне, перекрывающимся с рабочим диапазоном спектрографов «Спектр-УФ». Основным отличием в этой работе от

моделирования орбитальных приборов является наличие земной атмосферы, искажающей волновой фронт. Для сравнения наблюдаемых и модельных спектров нам необходимо было учесть влияние земной атмосферы. С этой целью пучок лучей на входе в оптическую схему телескопа и спектрографа генерировался со случайно меняющимися направляющими косинусами, тем самым эмулируя турбулентную атмосферу. Величина вариаций направляющих косинусов задавалась в соответствии с наблюдаемым на БТА качеством звездных изображений.

Полученные результаты показали хорошее соответствие реальных спектров и синтезированных в ходе обсчета модели спектрографа. На рис. 1 приведено сравнение наблюдаемого и расчетного спектра звезды. Для моделирования использовалось спектральное распределение энергии в источнике, рассчитанное с использованием отдельного пакета программ.

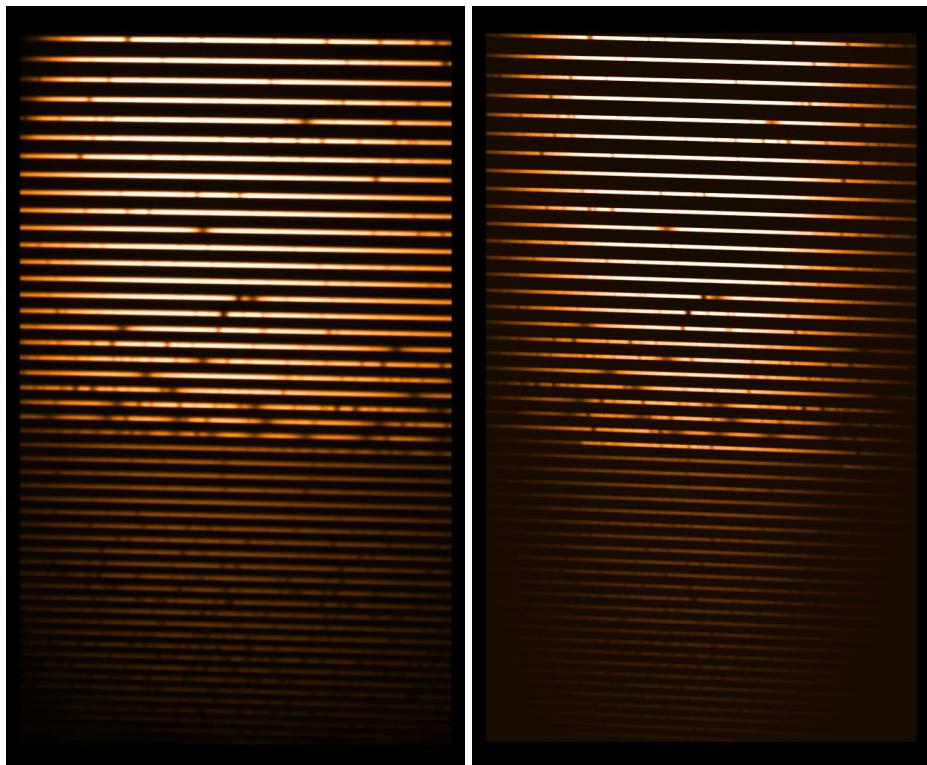


Рисунок 5 – Изображение эшелле-спектра звезды α Сyg в диапазоне длин волн 300-450нм, полученное на спектрографе НЭС (слева). И результат моделирования аналогичного изображения (справа).

Стандартными средствами обработки астрономических спектральных изображения произведена редукция и наблюдаемого, и синтезированного изображения. На рис. 2 приведено сравнение фотометрических разрезов индивидуальных спектральных порядков. Небольшие рассогласования в распределении энергии вдоль спектральных порядков и в положении спектральных линий, скорее всего, связаны с неидеальностью изготовления дифракционных решеток. Все эти рассогласования укладываются в технологические допуски на угол наклона рабочей грани штриха к плоскости решетки.

Спектральная аппаратура космической обсерватории «Спектр-УФ»

Основную часть блока научной аппаратуры космической обсерватории «Спектр-УФ» [11] занимают три прибора: спектрографы высокого разрешения УФЭС и ВУФЭС, предназначенные для работы соответственно в УФ и вакуумном УФ-диапазонах, и спектрограф низкого разрешения с длинной щелью СДШ. Оптические схемы этих приборов описаны в работе [12].

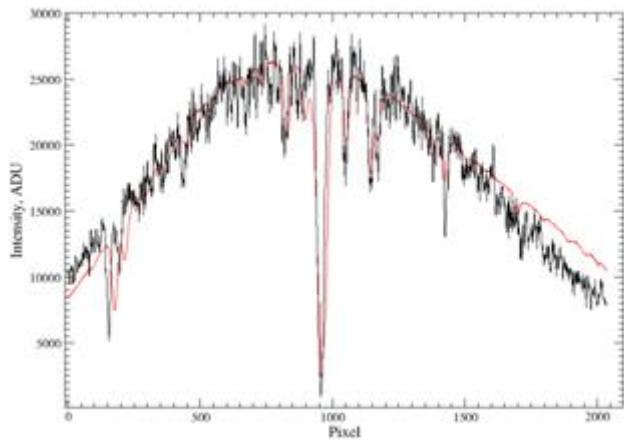


Рисунок 6 – Результаты обработки двух кадров, приведенных на рис. 1. Показано сравнение фотометрических разрезов двух спектральных порядков в разных частях кадра (левый и правый рисунки). Черная линия – результат экстракции синтезированного изображения, красная – наблюдаемого.

Работы по созданию математических моделей этих трех приборов были начаты нами на этапе эскизного проектирования для обоснования достижимости заданных в ТЗ характеристик по проникающей способности и спектрального разрешения. Окончательным результатом этой работы послужило существенное изменение оптических схем всех трех приборов, отказ от сложной системы механической стабилизации и уточнение требований к светоприемной аппаратуре.

На данный момент мы имеем модели всех приборов и можем получать синтезированные изображения спектров различных источников. На рис. 3 показан синтезированное изображение спектра звезды для спектрографа УФЭС и представлены фотометрические разрезы двух спектральных порядков. Фотометрические разрезы приведены в шкале длин волн. Калибровка выполнялась также по синтезированным изображениям [13].

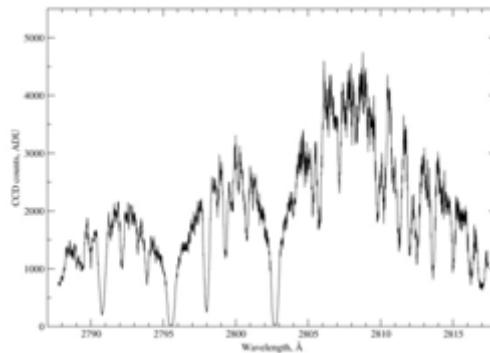


Рисунок 7 – Синтезированное для спектрографа УФЭС изображение спектра звезды α Cyg в диапазоне 169-325нм (слева) и результаты экстракции двух эшелле-порядков (справа).

Оптическая схема спектрографа СДШ имеет свою особенность. Она состоит из двух каналов, оптические элементы которых оптимизированы для работы каждый в своем диапазоне длин волн. Однако приемник излучения один, т.е. изображения из двух каналов оптическим способом сводятся на один светоприемник, установленный неподвижно. Моделирование показало выполнимость такой оптической схемы с необходимыми параметрами спектрального и пространственного разрешения. Результатом моделирования также стало точное определение параметров просветляющего покрытия кристалла светоприемника, поскольку в УФ-диапазоне характеристики приемника сильно меняются с длиной волны.

Система подсмотра звезды после входной щели спектрографа для «Спектр-УФ».

Первоначальная концепция спектральной аппаратуры космической обсерватории «Спектр-УФ» предполагала наличие ламп спектра сравнения. Последовательная регистрация изображений спектров калибровочных ламп давало возможность определить смещения оптических элементов в результате тепловой нестабильности приборов и компенсировать эти сдвиги наклоном сферического зеркала камеры спектрографа. Однако оставался нерешенным вопрос о компенсации ошибок системы стабилизации космического аппарата. В наземных наблюдениях изображение турбулентного диска звезды, как правило, превышает ширину входной щели спектрографа, поэтому спектральное разрешение прибора ограничивается шириной входной щели. При спектроскопических наблюдениях с околоземной орбиты изображение звезды неискажается влиянием атмосферы и не превышает размеры входной диафрагмы. В этом случае спектральное разрешение определяется точностью системы сопровождения и стабилизации космического аппарата.

Мы предложили схему контроля положения звезды относительно центра щели, использующую ту часть излучения, которая не регистрируется в виде спектра [14]. Нулевой порядок дифракции эшелле-решеток в спектрографах УФЭС и ВУФЭС или вогнутой дифракционной решетки в СДЦ содержит излучение в видимом диапазоне, которое у большинства астрофизических объектов на порядки превышает по интенсивности излучение в УФ. При помощи дополнительной оптики можно, используя этот нулевой порядок дифракции, построить изображение входной диафрагмы спектрографа, на котором мы сможем зарегистрировать блуждание исследуемого объекта на входе в спектрограф в течение экспозиции основного спектра. Получаем, таким образом, внутренний канал фотометрического контроля. Получая последовательность кадров в канале фотометрического контроля, мы определяем положение центра тяжести изображения объекта. Смещение центра тяжести изображения звезды в канале фотометрического контроля вызвано как неточностью системы слежения, так и тепловой нестабильностью прибора. Поскольку оптические элементы основного канала спектрографа и канала фотометрического контроля расположены на одних и тех же опорах, то смещения в основном канале и канале фотометрического контроля будут скоррелированы. Изначально предполагалось в качестве основных приемников излучения использовать МКП-детекторы, работающие в режиме счета фотонов. Имея информацию о блуждании звезды в канале фотометрического контроля, мы можем вносить коррекцию в координаты регистрируемого события на МКП-детекторе при формировании итогового кадра с изображением спектра исследуемого объекта. Такая схема позволила отказаться от компенсации нестабильности спектрографов наклонами сферических зеркал, что существенно увеличило надежность всего комплекса научной аппаратуры «Спектр-УФ».

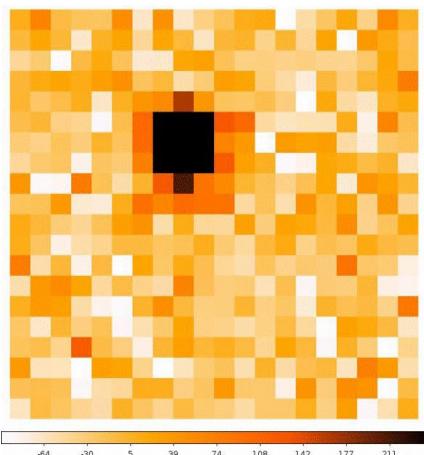


Рисунок 8 – Синтезированное изображение звезды в канале фотометрического контроля спектрографа УФЭС.

Для проверки своей идеи в модель спектрографов мы включили канал фотометрического контроля. Смоделированное изображение звезды в канале фотометрического контроля представлено на рис. 4. Далее мы задавали случайное блуждание звезды на входе в спектрограф и

оценивали точность определения координат центра изображения при различной яркости наблюдаемого объекта, результаты представлены на рис. 5.

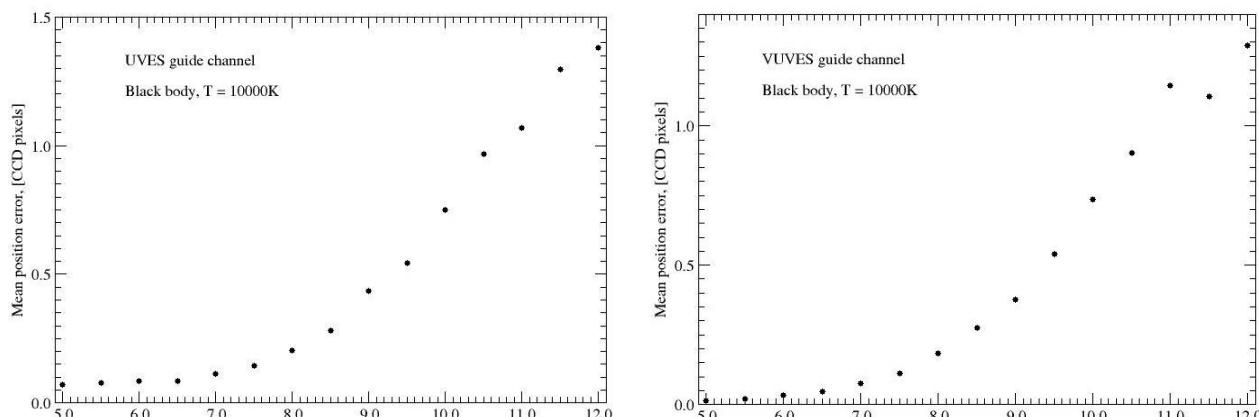


Рисунок 9 – Зависимость точности определения координат объекта в канале фотометрического контроля спектрографов УФЭС (слева) и ВУФЭС (справа) на единичном кадре, полученном с экспозицией 1 секунда.

Наличие канала фотометрического контроля и полная математическая модель всех спектрографов обсерватории «Спектр-УФ» позволили, в конечном итоге, полностью отказаться от ламп спектра сравнения на борту космического аппарата. Эти лампы являлись самым мощным энергопотребителем и имели значительное тепловыделение, что в условиях космоса является весьма существенной проблемой.

Заключение

В работе представлены наши разработки в области математического моделирования спектральной аппаратуры, предназначенной для астрофизических экспериментов. Показаны примеры влияния подобных моделей на сам процесс разработки приборов. Подобное моделирование мы выполняли и для Европейской космической миссии ARAGO, включающей эшелле-спектрополяриметр высокого разрешения [15]. Этот проект находится сейчас в стадии разработки. Предполагается, что на борту космического аппарата будет установлен двух канальный спектрополяриметр со спектральным разрешением 30000, работающий в диапазоне 119-888нм, захватывая и вакуумный ультрафиолет, и ближний ИК-диапазон.

Дальнейшее продолжение наших работ будет заключаться во включении результатов моделирования спектральной аппаратуры в систему обработки наблюдательных данных для того или иного прибора. Информация об изменении аппаратной функции спектрографа по всему формату кадра позволяет проводить оптимальную экстракцию спектра с учетом всех инструментальных эффектов.

Благодарности.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (РФФИ, проект № 16-07-01287-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Diego F., Walker D.D., Monthly Notices Royal Astron. Soc., 1985, vol. 217, p. 347.
2. Walker D.D., Diego F., Monthly Notices Royal Astron. Soc., 1985, vol. 217, p. 355.
3. Valenti J.A., Butler R.P., Marcy G.W., Publ. Astron. Soc. Pacific, 1995, vol. 107, p. 966.
4. Ballester P., Rosa M.R., Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 1997, vol. 126, p. 563.
5. Krist J., ASP Conf. Ser., 1995, vol. 77, p. 349.
6. Ghavamian P., Aloisi A., Lennon D., et al., COS Instrument Science Report 2009-01.
7. Yushkin M.V., Fatkhullin T.A., Panchuk V.E., Astrophysical Bulletin, 2016, vol. 71, p. 343.
8. Spencer G.H., Murty M.V.R.K., Journal of the Optical Society of America 1962, vol. 52, p. 672.

9. Palmer C., Fifth edition of Diffraction grating handbook, Eds.: Loewen E., Thermo Richardson Grating Laboratory (2002).
10. Panchuk V.E., Klochkiva V.G., Yushkin M.V., Astronomy Reports, 2017, vol. 61, p. 820.
11. Boyarchuk A. A., Shustov B. M., Moisheev A. A., Sachkov M. E., Solar System Research, 2013, vol. 47, p. 499.
12. Panchuk V., Yushkin M., Fatkhullin T., Sachkov M., Astrophysics and Space Science, 2014, vol. 354, p. 163.
13. Yushkin M., Fatkhullin T., Panchuk V., Sachkov M., Kanev E., Proceedings of the SPIE, 2016, vol. 9905, id. 990535 9pp.
14. Панчук В.Е., Юшкін М.В., Оптический журнал, 2006, т. 73, стр. 60.
15. Yushki M., Panchuk V., Perea Abarca B., Marcos-Arenal P., Sachkov M., Gomez de Castro A.I., Proceedings of the SPIE, 2016, vol. 9905, id. 99052Z 9pp.

III. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Айвазов Юрий Георгиевич, Абилова Карина Бауржановна

Северо-Кавказский федеральный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАТЕЖНОГО ПРОЦЕССА В РАБОТЕ МОБИЛЬНОГО БАНКИНГА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА

Аннотация. Рассмотрен вероятностный метод определения защиты аутентификационных данных при проведении мобильных операций. Определены требования к стандарту по защите информации платежной карточки (PCI DSS). Надёжность работы схемы платежного процесса оценена с вероятностной точки зрения с помощью вероятностной модели. Получено блочное представление последовательности прохождения первичной информации от объекта к объекту. Произведено вычисление вероятности искомого события с применением теоремы о сложении вероятностей групп попарно несовместимых событий и теоремы об умножении вероятностей независимых в совокупности событий.

Ключевые слова: мобильный банкинг, вероятностный метод, защита информации, теоремы о сложении вероятностей.

Annotation. The probabilistic method of definition of protection of authentication data when carrying out mobile operations is considered. Requirements to the standard are determined by information security of a payment card (PCI DSS). Reliability of work of the scheme of payment process is estimated from the probabilistic point of view by means of probabilistic model. A block impression of the sequence of passing of primary information from an object to an object is gained. Calculation of probability of a required event with application of the theorem of addition of probabilities of groups of in pairs incompatible events and the theorem of multiplication of probabilities of events independent in total is made.

Keywords: mobile banking, probabilistic method, information security, theorems of addition of probabilities.

Введение

В современном мире при проведении мобильных операций возникает множество проблем, которые схожи с проблемами при проведении сетевых электронных операций. В связи с данной проблематикой, для осуществления мобильных операций определены несколько аспектов.

Самой важной среди всех проблем остается проблема, связанная с безопасностью. Актуальность данной проблемы заключается в глобальном использовании общественных беспроводных сетей в передаче важных видов информации, таких как финансовая и уязвимая информация.

Одной из важнейших проблем при проведении торговых операций является отсутствие проверки объектом, использующим мобильное устройство, идентификационных данных «компаньона», при обмене зашифрованными сообщениями, создании и проверке цифровых подписей, предназначенных для подписи сообщений.

Решение данной проблемы кроется в применении известного подхода – применении инфраструктуры открытых ключей PKI. В случае использования PKI, требуется наличие в каждом приложении трех функциональных возможностей [1]:

- Возможность создания общественно-частных пар ключей;
- Возможность проведения анализа сертификатов хранилища, распространение ключей;
- Возможность проверки ключей цифровой подписи;

Проведение мобильных операций с поддержанием безопасной среды требует соблюдения следующих четырех требований безопасности [2]:

- Установление подлинности;
- Конфиденциальность коммуникации;
- Целостность сообщений;
- Управление доступом.

Необходимо установление безопасного канала связи между операционными сторонами. Первостепенно происходит установление подлинности, а затем установление безопасного канала. При двухстороннем успешном установлении подлинности, происходит установка секретного ключа между коммуникационными объектами.

Одной из самых важных услуг при проведении мобильных сделок является установление подлинности. Известно применение двух типов установления подлинности: местное и удаленное установление подлинности [3]. Приложения, работающие на мобильном устройстве, используют местное установление подлинности, защищающее устройство от несанкционированного доступа, для подтверждения подлинности пользователя, получающего доступ к мобильному устройству. Осуществляется установление подлинности для объектов, находящихся на удалении друг от друга.

Рассмотрим безопасный платежный подход на примере работы кредитной карты. Платежная обработка сложна и включает несколько сторон и связей между ними. Осуществление платежа с кредитной картой занимает несколько секунд [4]. Платежный процесс включает несколько сотрудничающих сторон, несколько обменов, а также стандарт защиты информации платежной карточки (PCI DSS). На рис. 1 показаны владельцу кредитной карты данные об идентификации, которые должны быть должным образом защищены, во время проведения плаательщиком сделки с кредитной картой, до момента пока продавец не получает переданную сумму [5].

Продавцы, чтобы быть совместными с PCI, должны тщательно осуществить 12 требований, заявленных в стандарте по защите информации платежной карточки (PCI DSS). Эти требования помогают обеспечить мобильно-коммерческую сервисную сеть, защитить данные владельца кредитной карты, вести управлеченческую программу уязвимости, осуществить меры по управлению доступом, регулярно контролировать и тестировать мобильно-коммерческую сервисную сеть и поддерживать информационную безопасность в мобильно-коммерческой организации.

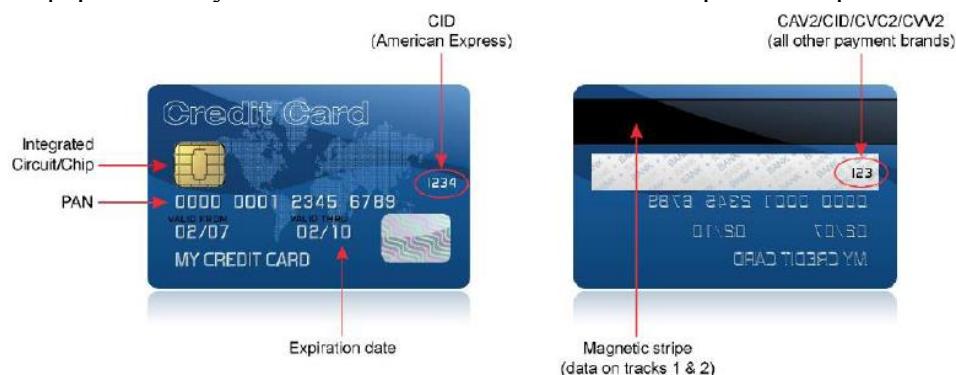


Рисунок 1 – Данные кредитной карты

Для понятия принципа платежного процесса необходимо ввести следующие понятия:

Инвестиционный банк - финансовая организация, которая предоставила мобильно-коммерческой фирме (продавцу) банковский счет. Инвестиционный банк получает операции по кредитной карте и совершают перевод на банковский счет фирмы. На рисунке 12 показан платежный процесс, который дает возможность для перемещения денег на банковский счет коммерческой фирме, прежде чем упомянутая сумма будет передана ему из эмиссионного банка владельца кредитной карты.

Эмиссионный банк является финансовой организацией, которая предоставляет кредитные карты людям для проведения покупок и других сделок. В большинстве случаев можно только приобрести кредитные карты от банков, где у них есть счет.

Ассоциациями карты являются учреждения, такие как Master Card, Visa, American Express. Они регулируют и стандартизируют отрасли платежа по карте, сотрудничая с различными

финансовыми и правительственные организациями, используя правила о требованиях безопасности.

Торговый процессор - связь между коммерческой фирмой и другой стороной, вовлеченных в процесс финансовой операции. У инвестиционного банка есть доступ ко всем картам, связанным с фирмой, что позволяет ему обрабатывать отправку запроса идентификации к соответствующей организации издания карты, а также передать одобренный запрос обработки финансовой операции к инвестиционным банкам от имени фирмы [6].

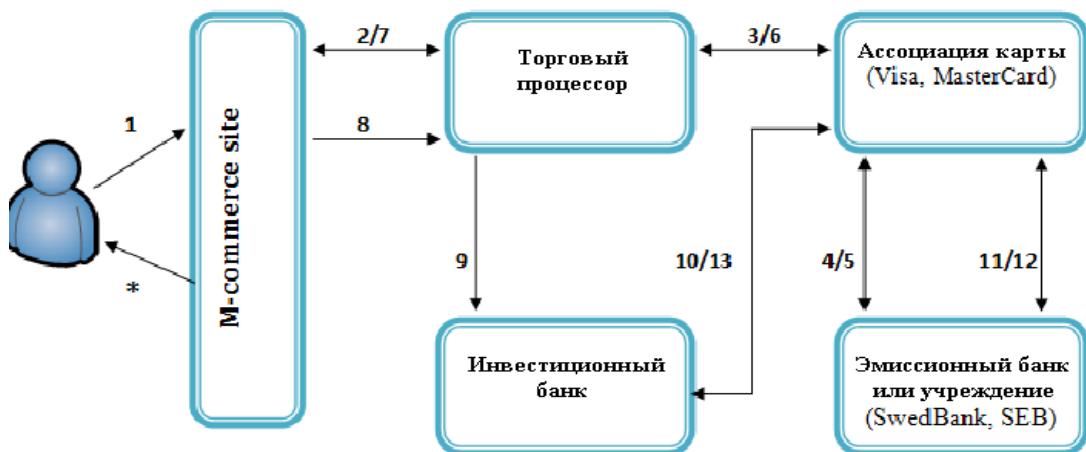


Рисунок 2 – Платежный процесс

Таблица 1 – Детали всего платежного процесса

№	Описание
1	Покупатель хочет оплатить услуги коммерческой фирмы, используя кредитную карту.
2	Приложение мобильной торговли фирмы запрашивает аутентификацию, отправляя информацию о карте и стоимость продукта (карточка платежа) к торговому процессору.
3	Торговый процессор определяет какая карта (Visa, MasterCard), и отправляет запрос авторизации идентифицированной ассоциации карты
4	Ассоциация карты идентифицирует (основанный на внутренней базе данных) банк, который выпустил карту, и отправляет запрос авторизации банку издания карты.
5	Банк издания или одобрит, или уменьшит транзакцию, основанную на их критериях набора. Решение отсылают назад к ассоциации карты.
6	Ассоциация карты отсылает решение назад к торговому процессору
7	Торговый процессор передает решение назад к коммерческой фирме.
8	В случае, где операция была одобрена, коммерческая фирма отправляет ее торговому процессору для того, чтобы обработать
9	Торговый процессор отправляет транзакцию инвестиционному банку, где у хранилища коммерческой фирмы есть учетная запись

10	Инвестиционный банк оплачивает операцию, включенное в операцию на учетную запись хранилища коммерческой фирмы. После этого запрашивается эквивалентная сумма от идентифицированной (см. сообщение 3) ассоциации карты
11	Ассоциация карты снова посыпает запрос на оплату банку, который выпустил карту.
12	Банк издания вычитает требуемую сумму со счета клиента. После этого процесса ассоциация переводит сумму на карту.
13	Ассоциация карты передает деньги инвестиционному банку
*	Коммерческая фирма хранит результаты всех операций и возвратов покупателей.

Чтобы сохранить для продавцов обработанные или переданные платежные данные владельца кредитной карты, реализуется стандарт по защите информации платежной карточки (PCI DSS), который включает в себя 12 требований для управления безопасностью, политикой, процедурами, сетевой архитектурой, проектированием программного обеспечения и других защитных мер. В совместимом подходе PCI продавцы выполняют обработку, передачу и хранение данных владельца кредитной карты. Таким образом, это важно для любого коммерческого приложения, использующего данный подход при совместимости с PCI.

Расчет надежности работы. Надёжность работы схемы платёжного процесса, изображённого на рис. 2, может быть оценена с вероятностной точки зрения, с помощью следующей вероятностной модели.

Если объекты, изображённые на рис.2, пронумеровать, то последовательность прохождения первичной информации от объекта 1 до объекта 6 можно изобразить схемой на рис. 1.

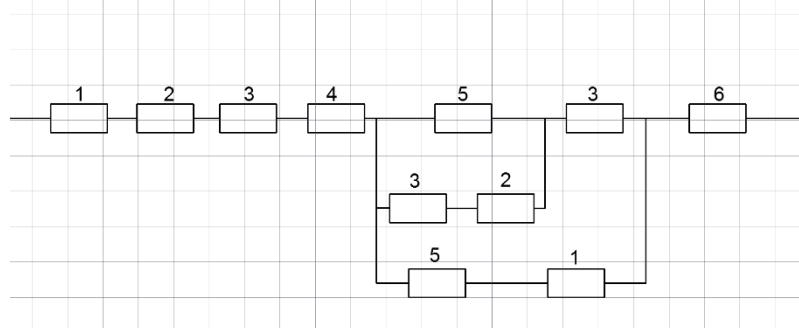


Рисунок 3 – Искомое событие

Выразим искомое событие A, заключающееся в том, что схема на рис. 3 будет работоспособна, через элементарные события $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$, заключающееся в том, что элементы 1,2,3,4,5,6 изображённые на схеме рис. 3, за некоторое контрольное время будут работоспособны, а также через противоположные события $A'_1, A'_2, A'_3, A'_4, A'_5, A'_6$, состоящие в том, что в течение того же времени перечисленные элементы могут отказать.

Для этого схему рис. 3 сначала предельно упростим, а затем поэтапно постепенно будем её усложнять до тех пор, пока она снова не примет первоначальный вид.

В первом упрощении схему рис. 3 можно представить в виде последовательного соединения элементов 1,2,3,4, I, 6 на рис. 4.

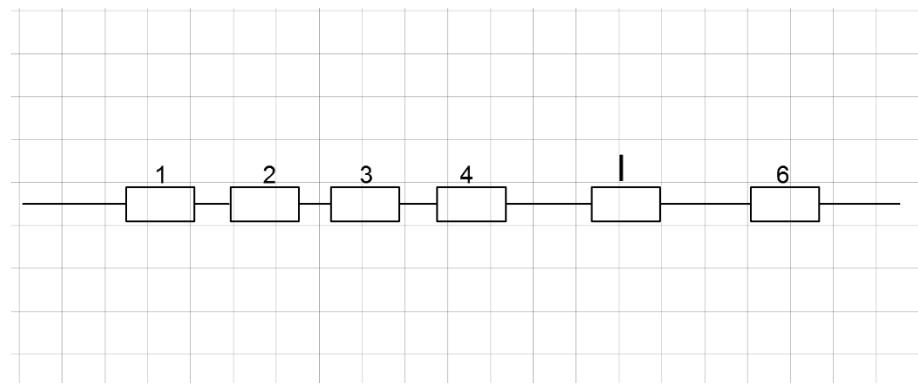


Рисунок 4 – Первое упрощение схемы

Через I обозначена схема, приведённая на рис. 5.

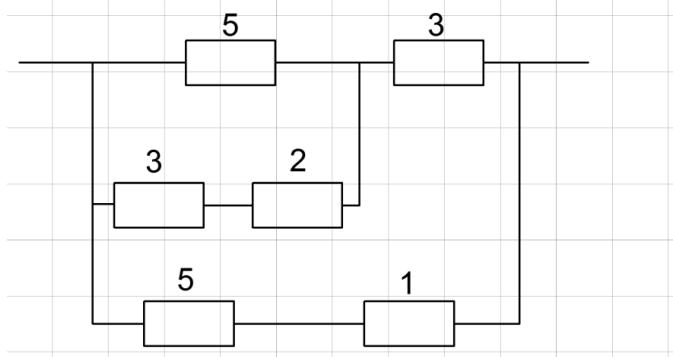


Рисунок 5

Искомое событие A, ввиду последовательного соединения элементов на рис. 4, представлена в виде произведения событий:

$$A = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_I * A_6. \quad (1)$$

Событие A_I состоит в том, что схема I в течение контрольного времени будет работать. Теперь распишем событие A_I . Для этого несколько усложним схему I, представив в виде параллельного соединения схем II и III, представленные на рис. 6 и 7.

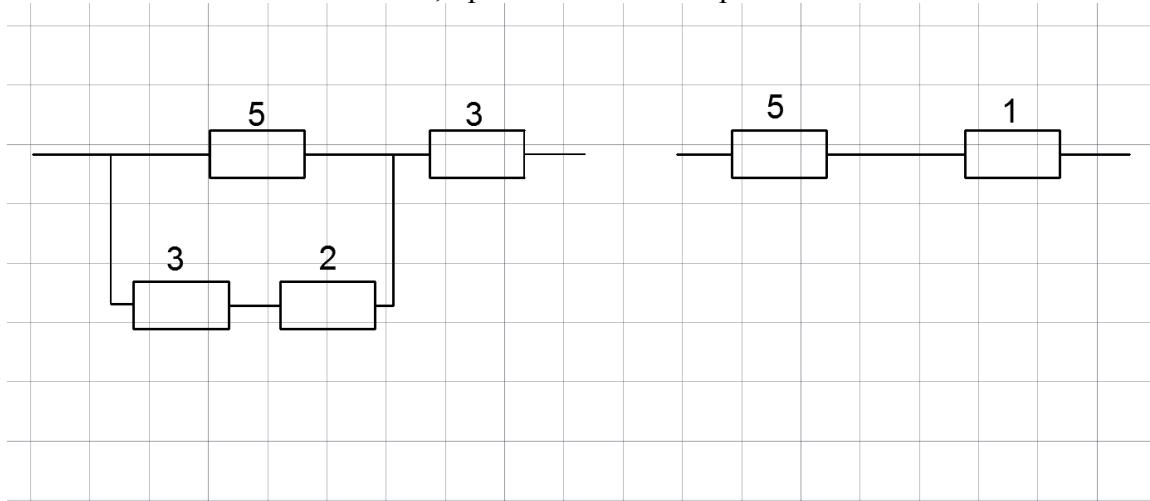


Рисунок 6

Рисунок 7

Выразим событие A_I через события A_{II} и A_{III} :

$$A_I = A_{II} * A_{III} + -A_{II} * A_{III} + A_{II} * A_{III}'. \quad (2)$$

Здесь событие A_{II} и A_{III} состоят в том, что в течение контрольного времени схемы II и III будут работоспособны, а события A_{II}' и A_{III}' состоят в том, что схемы II и III откажут, поскольку сумма противоположных событий $A_{II} + A_{II}'$ является событие достоверным, вероятность которого равна 1, то в формуле (2) можно произвести упрощение:

$$AI = AII * (AII + AII') + AII' * AII = AII + AII' * AII \quad (3)$$

Продолжим поэтапное усложнение полученных схем II и III.

Схема III представляет собой последовательное соединение элементов 5 и 4, поэтому:

$$AIII = A5 * A4 \quad (4)$$

$$AIII' = A5' * A4' + A5 * A4' + A5' * A4 = A4 * (A5' + A5) + A5' * A4 \quad (5)$$

$$AIII' = A4' + A5' * A4 \quad (6)$$

В формуле (5) учтено, что сумма противоположных событий A_5' и A_5 является событием достоверным, вероятность которого равна 1.

Чтобы рассчитать событие A_{II} , схему II несколько усложним, представив её в виде последовательного соединения схемы IV и элемента 3, как на рис. 8:

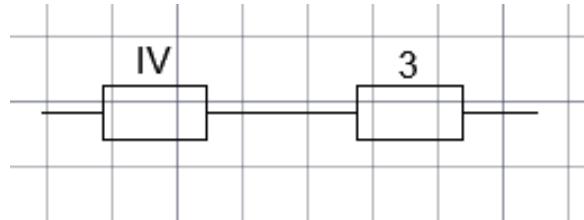


Рисунок 8

Схема IV в свою очередь представляем в виде параллельного соединения схемы V и элемента 5, на рис. 9:

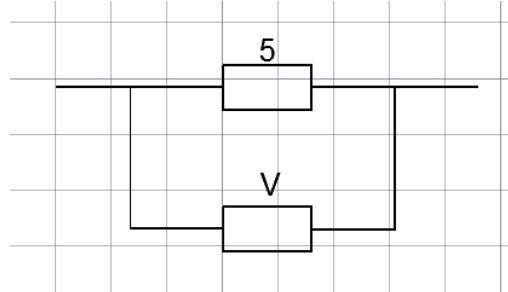


Рисунок 9

Событие A_{II} можно рассматривать в виде произведения событий A_{IV} и A_3 :

$$AII = AIV * A3 \quad (7)$$

Событие A_{IV} ввиду параллельного создания схемы V и элемента 5 представляется в виде:

$$AIV = A5 * AV + A5' * AV + A5 * AV' \quad (8)$$

Ввиду того, что сумма противоположных событий $AV + AV'$ является событием достоверным, вероятность которого равна 1, то:

$$AIV = A5 + A5' * AV \quad (9)$$

Рассмотрим подробно схему V, рис. 10:

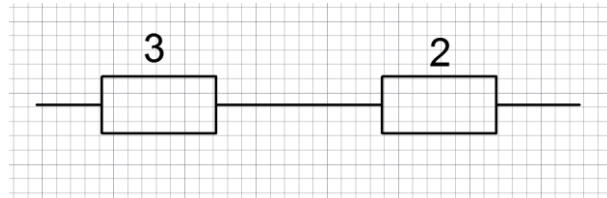


Рисунок 10

Ввиду последовательности соединения элементов 3 и 2 в схеме V, то событие AV представится в виде:

$$AV = A3 * A2 \quad (10)$$

Поскольку в формулах 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 все сложные события представлены в виде элементарных, то подставляя формулу (10) в формулу (9), формулу (9) в (8), формулу (8) в формулу

(7), а формулу (7), (6) и (4), в формулу (3), а формулу (3) в формулу (1), определим искомое событие А через элементарные события $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_1', A_2', A_3', A_4', A_5', A_6'$.

$$A = A_1 * A_2 * A_3 * A_4 [A_4 * A_5 + A_3 * (A_5 + A_5' * A_3 * A_2) * (A_4' + A_5' * A_4)] * A_6 \quad (11)$$

Вычислим вероятность искомого события А. Для этого, воспользуемся теоремами о сложении вероятностей групп попарно несовместимых событий, а также об умножении вероятностей независимых в совокупности событий.

$$P(A) = P\{A_1 * A_2 * A_3 * A_4 * A_5 * A_6 * [A_4 * A_5 + A_3 * (A_5 + A_5' * A_3 * A_2) * (A_4' + A_5' * A_4)]\} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P(A) = & P(A_1) * P(A_2) * P(A_3) * P(A_4) * P(A_6) * \\ * & P\{A_4 * A_5 + A_3 + (A_5 + A_5' * A_3 * A_2) * (A_4' + A_5' * A_4)\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P(A) = & P(A_1) * P(A_2) * P(A_3) * P(A_4) * P(A_6) * \{ P(A_4 * A_5) + \\ + & P[A_3 (A_5 + A_5' * A_3 * A_2) * (A_4' + A_5' * A_4)] \} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P(A) = & P(A_1) * P(A_2) * P(A_3) * P(A_4) * P(A_6) * \{ P(A_4) * P(A_5) + P(A_3) * \\ * & P(A_5 + A_5' * A_3 * A_2) * P(A_4' + A_5' * A_4) \} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P(A) = & P(A_1) * P(A_2) * P(A_3) * P(A_4) * P(A_6) * \{ P(A_4) * P(A_5) + P(A_3) * \\ * & [P(A_5) + P(A_5' * A_3 * A_2)] * [P(A_4') + P(A_5' * A_4)] \} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P(A) = & P(A_1) * P(A_2) * P(A_3) * P(A_4) * P(A_6) * \{ P(A_4) * P(A_5) + P(A_3) * \\ * & [P(A_5) + P(A_5' * A_3 * A_2)] * [P(A_4') + P(A_5' * P(A_4))] \} \end{aligned} \quad (17)$$

Заключение

По формуле (17) может быть оценена вероятность искомого события А, состоящая в том, что схема рис.2 в течение контрольного времени будет работать без сбоев, где указанная вероятность, согласно последовательности прохождения информации, приведённой на рис. 3, выражена через вероятность безотказной работы элементов 1, 2, 3, 4, 5, 6 и вероятности отказов этих же элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов Д. М., Жуков И. Ю. Исследование уязвимостей Bluetooth-передатчика мобильных телефонов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Ч. 2. - М.: НИЯУ МИФИ, 2014.
2. Михайлов Д. М., Жуков И. Ю., Ивашко А. М. Защита мобильных телефонов от атак. - М.: Фойлис, 2013.
3. Иванова Ю.В., Пашкова А.В. Дистанционное банковское обслуживание в России и странах Европы и США // Банковский ритейл. 2015. №2
4. Ильин И.Е. IFIN-2009: Новое в сфере безопасности электронных финансовых услуг // Управление в кредитной организации. 2014. №3
5. Heine G. GPRS Signaling and Protocol Analysis. Vol. 1: RAN and Mobile Station. Artech House Publishers, Bern, 2015.
6. Prabhaker M. Hacking Techniques in Wireless Networks. Dayton, Ohio: Department of Computer Science and Engineering – Wright State University, 2016.

УСТРАНЕНИЕ ДЕФИЦИТА КАНАЛА КЛИЕНТА ПРОВАЙДЕРА В МОМЕНТ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АТАКИ НА ОТКАЗ В ОБСЛУЖИВАНИИ

Аннотация. Целью данного исследования является анализ распределенных атак на ресурсы провайдера и разработка метода по устранению дефицита ширины канала его клиентов. Задачами исследования являются, предложение способа динамического расширения канала клиента за счет неиспользуемых ресурсов провайдера. В работе предлагаются метод по извлечению незадействованных ресурсов других клиентов провайдера с целью повышения пропускной способности канала испытывающего дефицит.

Annotation. The aim of this study is the analysis of distributed attacks on the resources of provider and method development to address shortages of bandwidth its customers. Objectives of the study are proposal of a method of dynamic channel expansion of the customer due to the unused resources of the provider. This work proposes a method for extracting untapped resources of other provider's customers with the aim of increasing the bandwidth of the client-deficient..

Введение.

Глобальная сеть Интернет переполнена нелегитимными запросами, которые не имеют логичного обоснования действий и, как следствие, сопровождаются нецелесообразной нагрузкой на каналы связей всех элементов системы.

Основной задачей атак такого рода является нелегитимное умышленное вмешательство в процесс функционирования определенных элементов сети. Как следствие, элемент сети, на котором была сосредоточена атака, перегружается и, следовательно, не имеет возможности отвечать на запросы в момент нехватки вычислительной мощности, однако, учитывая стремительно развивающуюся индустрию разработки программных продуктов, служащих для организации фильтрации и выявления нелегитимных запросов, более вероятен иной исход негативных последствий. Итак, наиболее актуальной проблемой на сегодняшний день является нехватка пропускной способности канала атакуемой машины.

Феномен нехватки пропускной способности канала обусловлен превышением ширины канала атаки относительно выделенной провайдером ширины канала атакуемой машины, что является причиной «простаивания» запросов легитимных пользователей в очереди для получения доступа к вызываемому ресурсу. Как правило, при длительном ожидании запросы основных пользователей самоликвидируются, в результате чего происходит отказ в доступе.

Данное явление возникает в результате предоставления услуг доступа к сети Интернет провайдером в формате статической ширины канала клиента. Такой принцип основывается на том, что в заключаемом договоре о предоставлении доступа в Интернет заранее установлен верхний порог ширины канала клиента. Отсюда следует, что сервис провайдера исключает возможность изменения ширины канала клиента во внештатных ситуациях.

Проблематичность описанной ситуации исходит из стремления повышения рентабельности работы провайдера, который, в свою очередь, не оставляет необходимого резерва в ширине канала, тем самым раздавая его количеству клиентов, способному занять всю ширину канала. Следовательно, в момент, когда весь канал провайдера распределен по клиентам, не представляется возможным варьировать шириной каналов клиентов по причине отсутствия резервов пропускной способности.

На сегодняшний день основной целью провайдера, предоставляющего услуги доступа в Интернет, является обеспечение и выполнение заранее установленных договоренностей с клиентом. Стандартная форма такого договора включает в себя приоритетную задачу по поддержанию фиксировано установленной ширины канала клиента. Фиксация канала означает установление

верхнего порогового уровня его пропускной способности. Кроме того, в договоренность входит условие, при котором провайдер не может предоставлять клиенту ширину канала ниже заранее оговоренного минимального порогового уровня.

Следовательно, заранее установленные верхние и нижние границы пропускной способности канала называются статическим предоставлением услуги доступа в Интернет. Отсюда вытекает, что провайдер имеет определенный вектор варьирования по динамическому уменьшению пропускной способности канала, однако не имеет возможности увеличивать ширину канала клиента ввиду нерентабельности данной процедуры относительно поставщика услуг Интернет.

Данный факт обусловлен отсутствием резерва ширины канала провайдера: статическое предоставление услуг доступа в Интернет дает возможность создания четкой иерархии элементов(клиентов) с последующим распределением ширины канала провайдера по указанным элементам. Графическое представление иерархической структуры провайдера со статическим предоставлением доступа в Интернет отображено на рисунке 1.

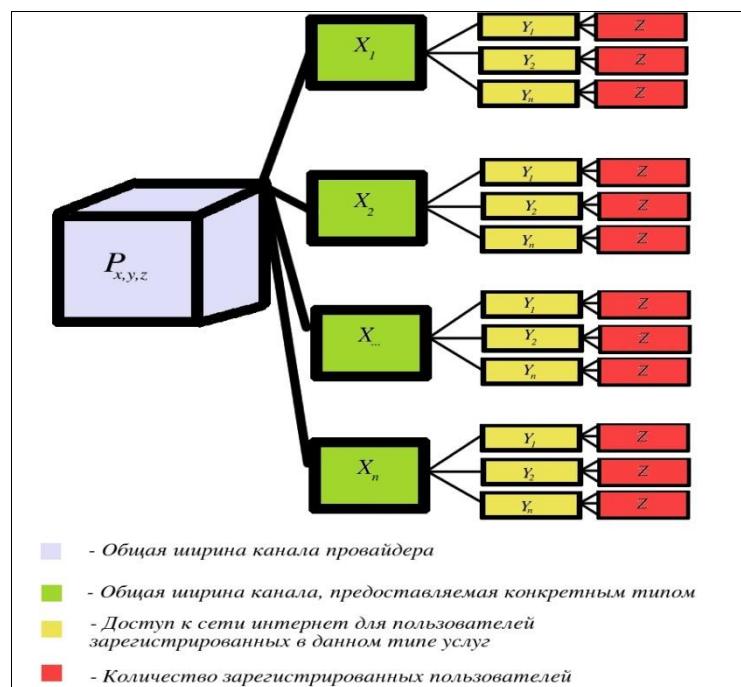


Рисунок 1 — Иерархическая структура клиентов провайдера

На рисунке 1 видно, что общая ширина канала $P_{x,y,z}$ первоначально подразделяется на типы услуг X_n , которые включают физические лица, организации, хостинги и т.д.; как правило, каждый тип подразделяется на некоторые тарифные планы Y_n . Переменная Z обозначает количество пользователей, заключивших договор с провайдером по типу услуг X_n в тарифном плане Y_n .

Исходя из информации, представленной на рисунке 1, можно описать процесс мониторинга клиентов провайдера в виде формулы (1)[2].

$$Spp_{x,y,z}(TkP) = M_{x,0,0} - (M_{x,0,0} * (TkP/M_{x,y,0})), \quad (1)$$

$$0 < x \leq Xn; 0 < y \leq Yn; 0 < z \leq P_{x,y,z}$$

где $M_{x,y,z}$ - матрица данных провайдера, содержащая значения типов услуг, тарифные планы и количество зарегистрированных пользователей, т.е. значения матрицы $M_{x,y,z} = P_{x,y,z}$:

$M_{x,0,0}$ - значение матрицы по общей ширине выделенных каналов каждого из типа услуг; x , y , z – переменные, отображающие значения в ячейках матрицы; Xn – количество типов услуг, предоставляемых провайдером; Yn – количество тарифных планов, входящих в число каждого типа услуги; TkP – количество онлайн пользователей, зарегистрированных в x типе услуг и тарифном плане y (данная величина является случайной, так как количество пользователей постоянно меняется, что способствует их динамическому изменению), записано в виде: $Tkp = Rand(M_{x,y,z})$.

Такой подход целесообразен при стандартных ситуациях, однако не в случае возникновения перегрузки канала, как в примере умышленного проведения DDOS-атаки[1], направленной на отказ в доступе канала связи. При указанном типе атаки происходит заполнение ширины канала нелегитимными запросами, что сопровождается стремительно возрастающей нагрузкой на канал клиента. Как следствие, провайдер может отключить атакуемого клиента от сети с целью обеспечения стабильной работы других клиентов. Происходит это по причине того, что провайдер должен расходовать вычислительные ресурсы на запросы, находящиеся в ожидании своей очереди[2].

На сегодняшний день наибольшую популярность получили методы DDOS-атаки, основанные на «отказе в обслуживании канала». Это обусловлено доступностью проведения атаки подобного типа относительно атак, направленных на вычислительные ресурсы машины, где может быть установлен программно-аппаратный комплекс по защите от DDOS-атак.

Предполагаемая методика решения выявленной проблемы.

Исходя из того, что основная проблема кроется в предоставлении провайдером статического доступа в Интернет, логичным ее решением станет разработка методики предоставления возможности динамического расширения канала клиента в момент превышения канала атаки (легитимного/нелегитимного трафика, поступающего на канал клиента провайдера) относительно ширины канала атакуемой машины.

Основной проблемой относительно провайдера, необходимого для динамического расширения канала клиента, является отсутствие резерва пропускной способности. Отсюда следует, что провайдеру следует изыскать свободные ресурсы, проявляющиеся в момент отсутствия некоторых клиентов в текущий момент времени или в момент слабой активности канала клиентов.

Представим систему, которая выявляет свободные ресурсы в виде черного ящика, который представлен на рисунке 2.

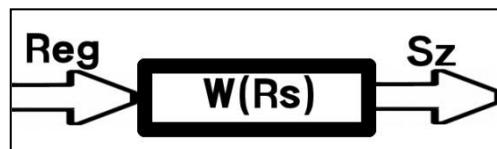


Рисунок 2 – Система формирования ширины канала клиента

На рисунке 2 видно, что существует передаточная функция $W(Rs)$, зависящая от необходимой ширины канала для клиента Rs . Задача данной функции состоит в формировании ширины канала (ФШК). Входным воздействием является значение регулятора, определяющего необходимость расширения канала, при котором передаточная функция получает значение требуемой ширины. Выходным значением системы является ширина канала клиента после ее расширения, которая обозначается как Sz .

Интегрирование данной схемы в общую систему функционирования провайдера при DDOS-атаке можно отобразить графически, как представлено на рисунке 3.

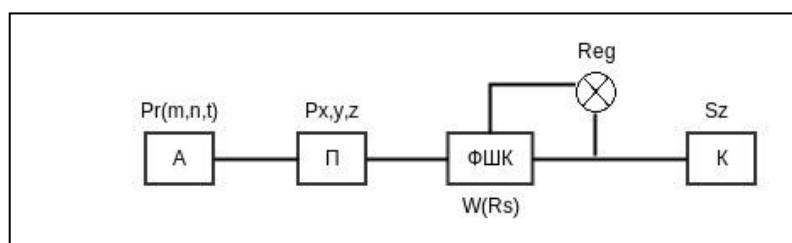


Рисунок 3 – Система функционирования провайдера с учетом интеграции ФШК

Где функция $Pr(m, n, t)$ - это ширина атакуемого канала на конкретный момент времени, зависящий от следующих переменных:

- t - время, прошедшее с момента атаки;
- n - количество компьютеров в b-ой подсети;
- m - количество подсетей, участвующих в атаке (если $i=0$ в данной подсети, $m=m-1$, т.е. количество подсетей сокращается на единицу).

Ширина канала атаки изначально попадает на канал провайдера $P_{x,y,z}$, а затем передается на модуль ФШК, после чего сформированная ширина канала, по которой запросы попадают на машину клиента, предоставляемая непосредственно клиенту. Далее запросы проходят программно-аппаратную фильтрацию, где нелегитимные пользователи попадают в черный список, а легитимные - на обработку вычислительной машины.

Логическая схема предоставления динамического расширения канала клиента представлена на рисунке 4.

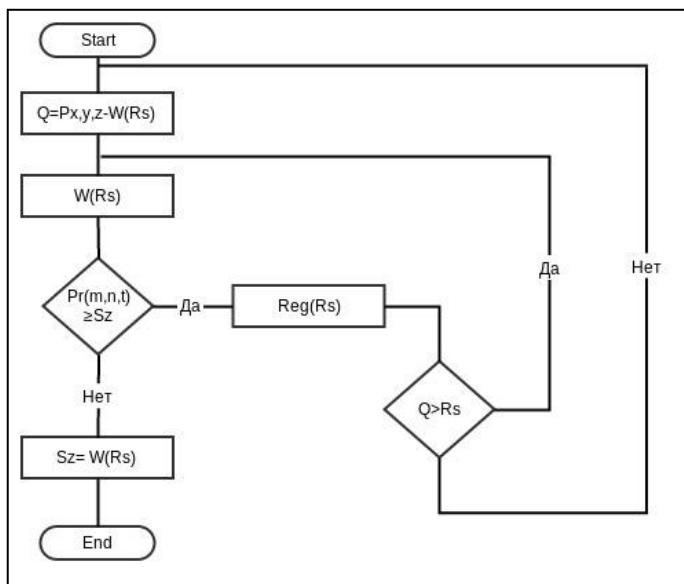


Рисунок 4 – Логическая схема динамического расширения канала клиента

Как видно из рисунка 4, изначально устанавливается необходимый запас провайдера $Q = P_{x,y,z} - W(Rs)$, после чего клиенту предоставляется стандартная ширина канала, установленная в договоре, после чего выполняется условие $Pr(m, n, t) \geq Sz$. Данное условие означает следующее: если ширина канала атаки больше ширины канала клиента, запускается регулятор, устанавливающий необходимый размер ширины и позволяющий пропускать весь трафик атаки без задержки. Однако перед передачей регулятором значения на ФШК выполняется условие $Q > Rs$, которое выдает истину в момент, когда запас провайдера Q становится больше, чем требуемое расширение канала Rs . Это необходимо для того, чтобы у провайдера оставался резерв для варьирования своими ресурсами в момент нагрузки на каналы других клиентов. Следовательно, при истинном значении регулятор запускает модуль ФШК, который формирует новую ширину канала для клиента.

При условии, что ширина канала атаки меньше ширины канала клиента, клиенту предоставляется стандартный размер канала, условленный в договоре.

Заключение

В ходе исследования был проведен анализ распределенных атак осуществляемых на ресурсы провайдера с целью переполнения выделенной ширины канала клиентам приводящих к отказу в обслуживании.

На основе проведенного анализа был разработан метод по устранению дефицита ширины канала клиента провайдера.

В работе предложен способ динамического расширения канала клиента за счет неиспользуемых ресурсов провайдера. Также предложен метод по извлечению незадействованных

ресурсов других клиентов провайдера с целью повышения пропускной способности канала клиента испытывающего дефицит.

Исходя из вышеописанной методики по решению представленной проблемы, следует, что для практической ее реализации необходимо использование методик прогнозирования и определения, в какой момент времени некоторые клиенты провайдера не будут находиться в онлайн режиме или их канал не будет высокоактивным, вследствие чего будут освобождены ресурсы, необходимые для расширения канала клиента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамедов Р.А. DDOS-атаки как интернет – терроризм и современные методы борьбы с ними // Материалы всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу»/ФГАОУ ВПО «СКФУ» (филиал) в г. Пятигорске 2013. Т2 (ч.II)-12-15;
2. Мамедов Р.А. Анализ применения и последствия массированных атак распределенного отказа в обслуживании на сервер со среднестатистической мощностью // Научно-технический вестник Поволжья. №3 2014. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, №3 2014. Ст. 150-157;
3. Мамедов Р.А. Системный анализ трафика провайдера на предмет выявления распределённой атаки на отказ обслуживания канала // Научный журнал "Современная наука и инновации" Выпуск № 1 Ставрополь – Пятигорск 2014 г. С. 24-31 ISSN 2307-910X
4. Мамедов Р.А., Системный анализ статического предоставления провайдером услуги доступа в интернет / Материалы III Всероссийской научно-практической конференции Том I «Молодёжь наука инновации» г. Грозный 2014 г. Ст. 32-37.
5. Мамедов Р.А., Казорин В.И., Могилевская Е В. Исследование зависимости динамического расширения канала клиента в момент максимальной нагрузки провайдера // Университетские чтения 2015. Материалы научной конференции (13-14 января 2015). – Пятигорск: ПГЛУ, 2015. – ч. 15. С. 35 – 41

РАННЯЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВНУТРЕННИХ УТЕЧЕК ДАННЫХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. Статья рассматривает процесс идентификации утечек данных на основе анализа поведения пользователей корпоративных информационных систем. Дано описание способа определения закономерностей поведения пользователей с использованием набора классификаторов и правил. Представлены процессы создания поведенческого профиля и идентификации утечек данных на основе вычисления информационной энтропии.

Ключевые слова: поведение пользователей, информационная энтропия, профиль поведения, предотвращение утечек данных.

Annotation. The article considers a process of behavior based data leaks detection. Data preprocessing is discussed. A behavior patterns finding method and a set of classifiers and rules are presented. Processes of behavior profiles creation and data leaks detection are described.

Keywords: users' behavior, frequent itemsets, information entropy, data leaks detection.

Введение. Деятельность по обеспечению сохранности конфиденциальных корпоративных данных включает предотвращение утечек данных и их идентификацию. Утечкой данных является умышленная или случайная передача конфиденциальных данных неуполномоченному индивидууму [1]. Характерной чертой внутренних утечек данных является сложность обнаружения, так как сотрудники предприятия имеют авторизованный доступ к вычислительным устройствам и могут быть осведомлены об используемых средствах защиты данных на предприятии [2]. В отчете, подготовленном компанией McAfee, утверждается, что 42% утечек данных на предприятиях являются внутренними [3]. Устойчивый рост количества подтвержденных утечек данных, в том числе в России, подтверждается отчетами компаний и экспертами в области информационной безопасности [4]. Ранняя идентификация позволяет выявить случаи подготовки к хищению данных или случаи непосредственной утечки данных.

Основными способами идентификации утечек данных являются использование языка [5]:

1. Правила и критерии, формируемые вручную администратором или с применением алгоритмов создания дерева принятий решений .

2. Анализ документов с использованием регулярных выражений и технологий машинной обработки естественного языка.

3. Анализ закономерностей поведения пользователей.

Идентификация утечек данных на основе анализа закономерностей поведения пользователей предполагает, что поведение сотрудника предприятия при хищении данных отличается от обычного поведения. Эти отличия могут проявляться в виде обращений к не свойственным для каждого дня работы отчетам и прочим программным инструментам, категориям данных и т.д. Помимо этого, причинами нарушения закономерностей обычного поведения могут быть неправомерное использование учетной записи сотрудника сторонним лицом или изменение должностных инструкций сотрудника.

Архитектура программного комплекса. В работах ученых Dorothy Denning [6] и Трошина С.В. [7] представлены программные архитектуры для предотвращения утечек данных. Модель предметной области включает следующие сущности: регистрируемая запись, поведенческий профиль пользователя, субъекты (пользователи или внешние вычислительные процессы) и объекты (базы данных, программные приложения).

Регистрируемая запись – это единица информации о поведении пользователя, является вектором, содержащим числовые, текстовые и категориальные данные. Регистрируемая запись

может хранить следующие характеристики поведения пользователя: имя пользователя, название вычислительного устройства, дата и время, название программного приложения, название действия пользователя, название программного инструмента и др.

В модель предметной области, созданной ученым Dorothy Denning, добавлена серия действий пользователей – упорядоченная по времени последовательность регистрируемых записей, в которой временной интервал между соседними регистрационными записями не превышает значение t . Серия действий может рассматриваться как единица взаимодействия пользователя с вычислительным устройством. Значение t является минимальным перерывом между взаимодействиями пользователя. Обычно в ходе такого взаимодействия пользователь использует несколько программных инструментов и решает профессиональную задачу: готовит отчет, добавляет новую запись в хранилище данных и тд. При исследовании регистрируемых записей отдельной серии действий пользователя возможно получение следующих характеристик поведения:

- Продолжительность серии действий;
- Минимальное, максимальное, среднее значения числовой переменной.
- Список уникальных значений категориальной переменной, который в дальнейшем может быть использован для поиска частых множеств признаков – устойчивых комбинаций значений переменной.

Профиль поведения пользователя содержит результаты анализа коллекции регистрируемых записей и серий действий. Поведенческий профиль пользователя позволяет хранить вычисленные характеристики поведения пользователя за определенный период наблюдения. Использование профиля поведения позволяет снизить количество хранимых регистрируемых записей.

Программное обеспечение, реализующее рассматриваемый в статье процесс идентификации утечек данных, имеет архитектуру, включающую следующие компоненты (рис. 2):

- Агенты для получения регистрируемых записей – используются для отслеживания действий пользователей, могут быть реализованы в виде подключаемого дополнения к интернет-браузерам, модуля ERP-системы «1С:Предприятие», сервиса операционной системы и других типов программных приложений. При совершении значимого для анализа действия пользователя компонент-агент создает регистрируемую запись и отправляет ее для дальнейшей обработки и хранения. Агенты отслеживают доступ пользователя к элементам программного приложения, вводимые и отображаемые данные.

- Обработчик регистрируемых записей – программный компонент, выполняющий сохранение и анализ полученных от агентов регистрируемых записей. Получение регистрируемых записей от компонентов-агентов происходит с использованием сервис-ориентированного интерфейса. Компонентом реализуются алгоритмы создания поведенческих профилей и идентификации утечек данных. Также обработчик регистрируемых записей предоставляет веб-интерфейс для управления настройками программного комплекса и просмотра отчетов и уведомлений.

- Хранилище данных. В качестве хранилища используется документно-ориентированная СУБД MongoDB. Использование документно-ориентированной архитектуры хранения позволяет хранить коллекции регистрируемых записей с произвольным числом атрибутов. Регистрируемые записи, полученные от разных агентов, могут отличаться размерностью (количеством атрибутов) и типом данных атрибутов.



Рисунок 1 – Компонентная архитектура программного комплекса

Создание профиля пользователя. Поведенческий профиль пользователя хранит вычисленные закономерности поведения и соответствующее им значение энтропии в виде векторов числовых значений. Каждый вектор формируется путем применения системы классификаторов и правил к коллекции упорядоченных по времени регистрируемых записей. Анализ регистрируемых записей, получаемых в виде потока, происходит с помощью перекрывающихся временных окон.

Классификаторы возвращают значение «0», если действие пользователя соответствует его обычному поведению, и значение «1» в случае несоответствия. Для проверки безопасности действий пользователей разработаны следующие классификаторы:

1. Классификатор на основе доверительного диапазона изменения значения информационной энтропии Шеннона.

2. Классификатор на основе сравнения частых множеств признаков, созданных с применением алгоритма Apriori.

3. Классификатор на основе критерия Колмогорова-Смирнова принадлежности выборок числовых данных одному закону распределения случайной величины.

В качестве дополнительного критерия безопасности действий пользователя используются оценивающие правила – специальные анализаторы регистрируемых записей поведения пользователей. Оценивающие правила возвращают результат «1» в случае соответствия регистрируемой записи критериям правила. В отличии от реализуемых в виде программного кода классификаторов, оценивающие правила задаются пользователем в виде стандартизированного XML-документа. Оценивающие правила удобны для указания дополнительных критериев безопасного поведения пользователей. Важным преимуществом оценивающих правил является скорость выполнения: в процессе применения правила выполняются операции сравнения, доступ к истории поведения пользователя не осуществляется. Оценивающие правила являются удобным средством для отслеживания обращений пользователей к объектам-ловушкам. Объекты-ловушки могут быть представлены в виде специальных элементов информационной системы, представляющих интерес для недобросовестных индивидуумов.

Для проверки действий пользователей предлагается использовать систему классификаторов и оценивающих правил, пример которой приведен на рисунке 1. Результат выполнения системы классификаторов и правил хранится в виде вектора, атрибуты которого могут принимать значения «0» или «1». После выполнения системы классификаторов и правил результат сохраняется в поведенческом профиле пользователя.

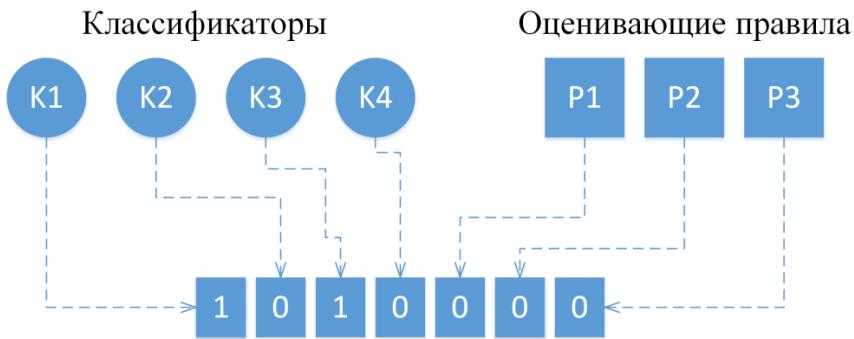


Рисунок 2 – Входные данные для процесса итоговой оценки

Поведенческий профиль создается для каждого пользователя и работает по принципу кольцевого буфера: старые записи вытесняются новыми. Кольцевой буфер реализован в виде специальной коллекции СУБД MongoDB – capped collection[8]. Каждая записи профиля включает следующие атрибуты: вычисленное значение информационной энтропии и результат выполнения системы классификаторов и правил.

Процесс идентификации утечек данных. В рассматриваемом способе аномальное поведение пользователя идентифицируется путем анализа профиля пользователя. Итоговая оценка безопасности поведения пользователя выполняется с помощью вычисления информационной энтропии на основе хранящихся в профиле пользователя коллекции результатов выполнения классификаторов и использовании коллекции предыдущих значений энтропии. Если вычисленное значение энтропии находится в допустимом диапазоне изменения, поведение пользователя считается безопасным. Допустимый диапазон изменения энтропии предлагается вычислять на основе стандартного отклонения. Подобный подход используется в области анализа финансовых рынков для поиска аномальных изменений цен с помощью диапазонов Боллинджера [9]. В ходе экспериментального анализа использовался диапазон $x \pm 2\sigma$, где σ – стандартное отклонение, x – значение энтропии. В случае выхода значения энтропии из доверительного диапазона, идентифицировать аномальное поведения можно по первой записи профиля, содержащей результаты выполнения системы классификаторов и правил.

Представленный в статье поведенческий профиль пользователя также удобен для анализа с использованием многослойного персептрона, так как его элементы имеют фиксированную размерность. Записи поведенческих профилей также могут быть использованы в качестве набора тренировочных данных для обучения нейронной сети.

Экспериментальный анализ. В ходе экспериментального анализа исследована точность классификаторов на основе доверительного колебания энтропии, сравнения частых множеств признаков и применения критерия Колмогорова-Смирнова. В настоящей работе исследовано поведение пользователей, работающих со следующим программным обеспечением: операционная система Windows 8.1, веб-браузер Google Chrome и ERP-система «1С:Предприятие». Для анализа использовалась коллекция регистрируемых записей 45 пользователей, содержащая равные количества векторов обычного и аномального поведения пользователя. В приведенном ниже списке показаны результаты независимого тестирования классификаторов. Пользователи с устойчивой закономерностью поведения имеют более 90% истинно положительных и менее 70% ложноотрицательных результатов.

Для исследования поведения пользователей выбраны следующие характеристики (в скобках указана доля пользователей с устойчивой закономерностью):

1. Сравнение выборок длин серий действий пользователя критерием Колмогорова-Смирнова (17,78%).

2. Сравнение выборок количества действий в сериях действий пользователя критерием Колмогорова-Смирнова (48,89%).

3. Энтропия для категориальной переменной «Идентификатор вычислительного устройства» (40%).

4. Энтропия для категориальной переменной «Исполняемый файл программного приложения» (26,67%).

5. Энтропия для категориальной переменной «Используемый программный инструмент 1С:Предприятие» (33,33%).

6. Частые множества признаков для категориальной переменной «Исполняемый файл программного приложения» (44,44%).

7. Частые множества признаков для категориальной переменной «URL-адрес» (35,56%).

Приведенные выше результаты подтверждают необходимость использования системы классификаторов и правил, так как применение классификаторов по отдельности не обеспечивает достаточную точность.

Результаты классификации поведения пользователей на основе доверительного диапазона изменения информационной энтропии показаны в таблице 1. Случай утечки данных имитировался путем добавления записей из поведенческого профиля стороннего пользователя в исследуемый профиль.

Таблица 1 – Примеры значений энтропии для обычного и аномального поведения пользователей

Пользователь	Энтропия при обычном поведении	Энтропия при нарушении закономерностей поведения
A	0,93 0,82 0,66 0,41 0,41 0,66	1,44
B	0,64 0,52 0,25 0,25 0,50 0,74	1,37
C	0,80 0,74, 0,73 0,65 0,54 0,41	1,29

На рисунке 3 показан пример выхода значения энтропии из доверительного диапазона.

Уведомление #58
Пользователь: P_Krasnov

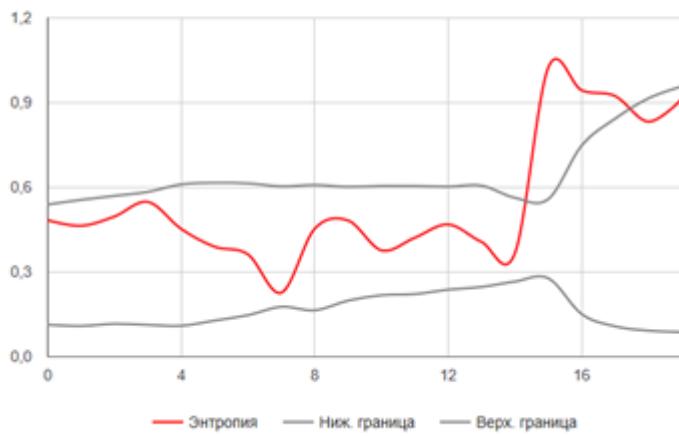


Рисунок 3 – Пример изменения энтропии

Заключение. Отличием представленного способа идентификации утечек данных является использование классификаторов, не требующих создания тренировочного набора данных и последующего обучения. В ходе экспериментального анализа подтверждено, что закономерности

поведения пользователя могут быть определены с использованием набора специализированных для различных типов данных классификаторов и правил.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shabtai A., Elovici Y., Rokach L. A survey of data leakage detection and prevention Solutions. - Berlin, Germany: Springer, 2012.
2. Koch R. Towards Next-Generation Intrusion Detection // 3 International Conference on Cyber Conflict. - New York, USA: IEEE, 2011. - C. 1-18.
3. Grand Theft Data Data exfiltration study: Actors, tactics, and detection // Intel Security – McAfee. URL: <https://www.mcafee.com/us/resources/reports/rp-data-exfiltration.pdf>
4. Ли И. Утечки встали на поток // РБК. - 2017. - 08, июнь. - Ст. 1.
5. Costante E., Vavilis S., Etalle S., Hartog J., Petkovic M., Zannone N. Database anomalous activities - detection and quantification // Proceedings of the 10th International Conference on Security and Cryptography. - Setubal, Portugal: SciTePress, 2013. - C. 603–608.
6. Denning D. E. An Intrusion Detection Model // IEEE transactions on software engineering. - 1987. - №SE-13, 2. - C. 222-232.
7. Трошин С. В. Мониторинг работы корпоративных пользователей //Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского №2(16)/2009, г. Тамбов, 2009, сс. 59-72.
8. MongoDB Capped Collections. // Mongo DB Docs. URL: <https://docs.mongodb.org/manual/core/capped-collections/> (дата обращения: 19.05.2016).
9. Колби Р. Энциклопедия технических индикаторов рынка (The Encyclopedia of Technical Market Indicators). — М.: «Альпина Паблишер», 2011. — 840 с.

МОДЕЛЬ УГРОЗ ДЛЯ СИСТЕМ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ¹

Аннотация. В связи с ростом популярности мобильных роботов, беспилотных летательных аппаратов, также других робототехнических средств актуальными становятся задачи создания систем группового управления роботами (СГУР). А также в связи с участниками сложившимися случаями нарушения безопасности робототехнических средств актуальными становятся задачи разработки средств защиты СГУР. Основной целью данной работы является анализ и исследование основных угроз актуальных для различных принципов, методов и особенностей группового управления. В данной статье решаются следующие задачи: анализ особенностей построения СГУР, анализ угроз характерных для СГУР, построение модели угроз СГУР.

Ключевые слова: система группового управления, роботы, угрозы, уязвимости, модель, атаки, злоумышленник.

Annotation. Interaction with the growing popularity of mobile robots, air drones, as well as other robotic means of actual tasks of creating systems for group control of robots (SGCR). And also in connection with the increased cases of security breach of robotics, the tasks of developing SGCR protection equipment are becoming topical. The main purpose of this work is to analyze and study the main threats relevant to different principles, methods and features of group management. In this article, the following tasks are solved: analysis of the features of the SGCR construction, analysis of threats specific to the SGCR, construction of the SGCR threat model.

Keywords: group management system, robots, threats, vulnerabilities, model, attacks, attacker.

Введение

На сегодняшний день достаточно актуальными являются вопросы разработки систем группового управления подвижными объектами. Популярность данной тематики связана в основном с широким распространением роботизированных подвижных объектов, простоты сборки роботов, дешевизны комплектующих, а также наличие хорошей технической поддержки. При наличии большой группы объектов, выполняющих одинаковую задачу, дистанционной или автономное управление становится достаточно сложными, так как невозможно за ранее распределить задачи между роботами, с учетом изменений в состоянии окружающей среды, а также самих задач. Системы группового управления могут позволить решать задачу в динамике, выбирая для этого наиболее выгодные пути решения, подбирая для этого наиболее подходящих роботов. Совместно с ростом популярности и массового использования роботов происходит рост инцидентов в области нарушения информационной безопасности роботизированных объектов. Зафиксированные случаи нарушения информационной безопасности устройств пока что связаны в основном с перехватом управления за счет нарушения или изменения физических параметров роботов, к примеру, атаки на GPS приемник, либо перехват передаваемых по радиоканалу данных [1]. Проведение подобных атак возможно из-за полного отсутствия мер по обеспечению безопасности. Кроме очевидных атак на физические параметры робота, на сенсорную систему и устройства возможно проведения и активных информационных атак. Проведение данных атак в особенности на сети, которые используют Wi-Fi, представляется достаточно несложной задачей, так как существует набор стандартных утилит, позволяющих провести данные атаки.

1. Анализ особенностей построения систем группового управления роботами (СГУР)

Для дальнейшего анализа угроз и уязвимостей СГУР было проведено исследование, направленное на выявление характерных особенностей СГУР и принципов их построения, а также

проведен анализ некоторых методов управления роботами. Ниже перечислены основные выявленные особенности СГУР.

1. Группы роботов используются для выполнения определенных целей. Данные цели распределяются между роботами. Для выполнения конкретной цели могут использоваться не все роботы, а только часть роботов. В этом случае в группе формируется подгруппа роботов, в состав которой входят группы роботов ориентированные для решения конкретной задачи.

2. При реализации методов централизованного управления группа роботов может иметь «робота-лидера». При централизованном управлении система управления каждого робота группы получает алгоритм действий данного робота по информационным каналам и реализует его. При централизованном управлении для повышения надежности лидеры группы могут многократно дублироваться [2].

3. В децентрализованной системе управления решения как по распределению задач и формированию соответствующих подгрупп, так и по управлению действиями роботов во всех случаях принимаются самими роботами. Бортовой вычислитель робота позволяет в автономном режиме планировать траекторию перемещения, реализовывать позиционно-траекторные законы управления, обрабатывать информацию от сенсорной и коммуникационной подсистем и управлять исполнительным устройством.

4. Данные, получаемые роботом от других роботов посредством коммуникационной системы, могут содержать сведения о состоянии и действиях роботов, о состоянии среды и роботов из других подмножеств

5. Иерархическая структура системы управления включает в себя:

- стратегический уровень управления - решаются задачи целераспределения, определения путей достижения целей, формирования групп, кластеров и структуры строя мобильных роботов.

- тактический уровень управления - решаются задачи определения роботом своего целевого положения в структуре слоя, планирование траектории к своему целевому положению в соответствии с данными сенсорной подсистемы и данными от других роботов, позиционно - тракторное управление.

6. Метод потенциальных полей. Метод основан на формировании «заряда» вокруг объектов системы. Те объекты, которые должны двигаться друг к другу, наделяются противоположными зарядами, а те, которые должны сближаться зарядами одинаковый знаков. Движение роботов определяется влиянием результирующих «сил», формируемых системами управления в зависимости от «зарядов» и расстояний между элементами [3].

7. Коллективное управление. Система ориентирована на итерационный поиск оптимальных действий роботов группы на каждом шаге. СГУР располагает информацией о состоянии среды лишь на текущий момент времени. Робот группы знает информацию о поставленных задачах и связан со всеми роботами группы посредством информационных каналов и получает информацию об окружающей среде. Итерационный процесс работает следующим образом: роботы поочередно выбирают действия из набора допустимых действий робота необходимых для выполнения задачи. После того, как робот выбрал новое действие и добавил его к текущему набору, все роботы должны также выбрать это действие. Этот процесс будет продолжаться, пока все роботы не сделают свой выбор. По окончании итерационного процесса, выбранные роботами действия передаются на исполнение и выполняются роботами в течение заданного интервала времени. Переходя к решению задачи, роботы оценивают эффективность достижения ими цели и сообщают полученные оценки, всем роботам группы, составляя общую матрицу [4].

2. Угрозы, характерные для СГУР

Таким образом, были выделены основные особенности систем группового управления. Определив данные особенности, можно достаточно эффективно определить угрозы, характерные для СГУР. Рассмотрим угрозы, характерные для СГУР.

1. Угроза перехвата управления процессом кластеризации системой группового управления подвижными объектами. Угроза заключается в возможности осуществления нарушителем несанкционированного доступа к информационной инфраструктуре за счёт получения

нарушителем права управления узлами, входящими в ее состав. Данная угроза обусловлена возможностью несанкционированного доступа к данной системе посредством перехвата информации, передающейся по беспроводному каналу. Реализация данной угрозы злоумышленником возможна при условии способности злоумышленника генерировать поддельные пакеты, которые содержат искаженные данные о физических возможностях злоумышленного узла, а также реализация данной угрозы возможно при наличии у злоумышленника более мощного (в отношении ресурсов: наличие более мощного приемо-передатчика сигналов, мощного заряда аккумулятора) устройства, чем предусмотрено в сети.

2. Угроза подмены данных об узле путем посылки ложных сообщений. Угроза заключается в том, что в некоторых системах группового управления узлы отправляют информацию не только о собственных данных, но и информацию о соседних узлах которые находятся в непосредственной близости от них. Таким образом, злоумышленник может отправить поддельные данные о соседнем узле, чтобы скомпрометировать его. Кроме того, злоумышленник может перехватить подлинный узел сети, так как узлы могут располагаться вне контролируемой зоны и отправлять ложные сообщения о его состоянии. Третьим вариантом реализации атаки, является внедрение злоумышленником собственного узла в сеть и отправка ложных сообщений о самом себе, чтобы быть выбранным для выполнения цели и в дальнейшем нарушить процесс ее выполнения.

3. Угроза искажения информации о целях, передаваемой для составления общей матрицы целей. Узлы группы передают информацию об эффективности выполнения той или иной цели из списка заданных целей. Внедрившись в группу в качестве легитимного пользования, злоумышленник может посыпать ложные данные об эффективности выполнения той или иной цели, чтобы в дальнейшем выбрать ее и не выполнить, нарушив работу системы. Злоумышленник может оказывать влияние на окружающую среду или сенсорную систему конкретных роботов, а также на саму цель, чтобы нарушить процесс выбора и распределения целей.

4. Угроза нарушения итерационного процесса выбора действий и целей узлами группы. В процессе выбора действий узлы выбирают действия из заданного списка необходимые им для выполнения задания, выбранные действия распространяется между всеми узлами группы. Злоумышленник может повлиять на увеличение времени выполнения итерационной процедуры выбора действия, путем выбора излишних действий, что приведёт к увеличению времени как этапа выбора действий, так и этапа выполнения действий, так как узлы будут выполнять все выбранные действия. Далее злоумышленник может воздействовать на процесс выбора целей, когда матрица целей сформирована узлы, согласно заданному алгоритму выбирают цели. Нарушить алгоритм злоумышленник может следующим образом: злоумышленник будет выбирать неэффективные для себя цели, злоумышленник попытается подделать номер узла и осуществить выбор цели вместо подлинного узла сети.

5. Угроза несанкционированного доступа к программно-аппаратному обеспечению роботизированных средств за счет их расположения вне контролируемой зоны. Как правило, роботы располагаются в незащищенных и неконтролируемых средах, при этом злоумышленник может достаточно легко перехватить любой узел в свое пользование. Как правило, программное обеспечение роботов строится на основе Linux- подобных операционных систем, причем количество существующих типов как самих микроконтроллеров или бортовых вычислителей, так и программного обеспечения для них является ограниченным. Таким образом, злоумышленник, обладающий знаниями об особенностях устройства таких систем, сможет внедрить собственный код и изменить конфигурацию системы. Кроме того, злоумышленник сможет поменять аппаратную конфигурацию устройства, изменив конфигурацию сенсоров, а также элемент питания робота, что может стать критически важным в случае с роботом, выполняющим обязанности главы группы или кластера.

6. Угроза воздействия злоумышленника на параметры окружающей среды. Злоумышленник может создавать физические препятствия для робота, чтобы помешать ему выполнение заданной цели. Данные препятствия зависят от набора действия, которые доступны роботу. Если робот настроен на доставку груза к заданной цели, то злоумышленник может следовать перед ним мешая ему достичь цели, кроме того злоумышленник может использовать более мощный приемо-

передатчик для глушения канала связи. Акустический удар, вызывающий резонанс механической части бортового гироскопа .Маломощный лазер, способный сбивать квадрокоптеры. (2 кВт, 294 кг). В Германии разработана собственная лазерная система, способная сбивать квадрокоптеры на расстояниях до 5 км, 40 Вт. Квадрокоптеры, оснащенные более мощными двигателями, например, дизельными, с более защищенным корпусом и устройствами для разрушения других квадрокоптеров, Отлов беспилотников с помощью более мощного квадрокоптера, снабженного кевларовой сетью [5].

7. Угроза подмены узла, выполняющего роль лидера группы злоумышленным узлом. Злоумышленник, внедрившийся в сеть, может подделать передаваемые данные о своих возможностях, в частности расположение по отношению к цели, оставшийся запас энергии и будет выбран в качестве лидера группы.

8. Угроза нарушения синхронизации работы между дублированными лидерами группы. Если лидеры группы дублируются, то необходимо соблюдать синхронизацию команд, посылаемых лидерами членам группы. Перехватив управление дублированным лидером или проведя атаку отказ в обслуживании на дублируемую сущность, злоумышленник может нарушить процесс синхронизации.

9. Угроза создания нескольких сущностей злоумышленником для получения контроля над сетью. Угроза заключается в том, что в СГУР с централизованным управлением допустимо дублирование лидера группы. Таким образом, злоумышленник может законно дублировать сущности в данной системе. Создав поддельную сущность с более высокими показателями или приоритетом, чем остальные члены группы и продублировав ее в системе, злоумышленник может получить контроль над сетью.

11. Угроза нарушения процесса группового управления путем подмены данных о «зарядах» объектом. Метод потенциальных полей основан на том, что при реализации данного метода узлы сети обмениваются данными о зарядах: отрицательных или положительных. С учетом этих данных узлы выбирают тех соседей, с которыми будут взаимодействовать. Если злоумышленник поменяет информацию о зарядах, то не правильно будут сформированы результирующие силы и таким образом нарушен процесс выполнения задачи группой роботов. Реализация данной угрозы возможно путем проведения атаки «Человек посередине», данная атака предполагает выполнение подмены данных, передаваемых между узлами сети, причем сами узлы не будут знать о подмене, и будут воспринимать эти данные, как подлинные данные о соседних узлах.

12. Угроза применения методов обратного инжиниринга для получения информации о типе загрузчика, контроллера полетов и протокола загрузчика. Угроза состоит в возможности получения злоумышленником информации о типе протокола загрузчика за счет того, что многие протоколы являются открытыми. Протоколы загрузчиков либо определяются производителями микросхем, либо документируются сообществом разработчиков. Кроме того, протоколы могут быть инвертированы путем просмотра последовательной связи с использованием любого из анализаторов последовательного порта, такого как PortMon от Sysinternals или Serial Port Monitor [6]. Для анализа протокола также можно посмотреть исходные файлы загрузчика, доступные в проектах с открытым исходным кодом.

13. Угроза модификации прошивки бортового вычислителя с использованием уязвимостей последовательных интерфейсов, обеспечивающих связь между ведущим и ведомым устройствами. Датчики взаимодействуют со встроенным CPU с использованием последовательного протокола с низкой пропускной способностью, такого как I2C, SPI или UART. Чтобы определить место, где в прошивке происходит обмен данными с сенсорным блоком, можно использовать анализаторы протоколов SPI или I2C для записи потока байтов, полученных с сенсора. Как правило, ограниченное количество портов I2C и SPI доступно в базовом CPU контроллера полета. Подключения датчика блока может быть прослежены к одному из доступных портов процессора. Как только связи между потоками байтов и портами процессора и блока датчика установлены, код, «обслуживающий» эти порты с заданными байтовыми последовательностями, можно искать внутри прошивки [7].

14. Угроза подмены оригинального оборудования контроллера полетов доступными платами разработки. Например, многие контроллеры полетов на базе Arduino и их прошивки можно моделировать на стандартной плате Arduino. Ряд проектов контроллера FLI, таких как FlyingF3, FlyingF4 и PX4, позволяют устанавливать их прошивку на платах серии Discovery компании STMicroelectronics. Популярные чипы сенсоров, такие как MPU6050 от InvenSense и MPU9150, MS5611 от MEAS, BMP085 от Bosch и HMC5883L от Honeywell, также доступны на разделительных платах, что обеспечивает удобный способ подключения датчиков к платам разработки и проведения испытаний и экспериментов. При подключении многожильной платы датчика к любой из плат разработчиков, загруженной с указанной прошивкой контроллера полета, злоумышленник может наблюдать протокол связи, используя анализатор протоколов, такой как Saleae Logic . Имея такую конфигурацию, злоумышленнику гораздо легче подключиться к контактам датчика, чем это было бы при использовании оригинальных плат контроллера полетов.

15. Угроза нарушения доступности GPS приемника. Злоумышленник может реализовать данную угрозу, обладая более мощным передатчиком GPS сигнала. Spoofing атака на GPS — атака, которая пытается обмануть GPS-приемник, широковещательно передавая немного более мощный сигнал, чем полученный от спутников GPS, такой, чтобы быть похожим на ряд нормальных сигналов GPS [8]. Эти имитировавшие сигналы, изменены таким способом, чтобы заставить получателя неверно определять свое местоположение, считая его таким, какое отправит атакующий. Поскольку системы GPS работают измеряя время, которое требуется для сигнала, чтобы дойти от спутника до получателя, успешный спуфинг требует, чтобы атакующий точно знал, где его цель — так, чтобы имитирующий сигнал мог быть структурирован с надлежащими задержками сигнала. Атака спуфинга GPS начинается, широковещательно передавая немного более мощный сигнал, который указывает корректную позицию, и затем медленно отклоняется далеко к позиции, заданной атакующим, потому что перемещение слишком быстро повлечет за собой потерю сигнальной блокировки, и в этой точке spoofing станет работать только как передатчик помех.

3. Модель угроз СГУР

Далее, объединив данные полученные из анализа особенностей построения СГУР и угроз, характерных для СГУР, можно сформировать модель угроз СГУР. В данной модели угроз представлен объект угрозы, далее угрозы, характерные для данного объекта и способ воздействия со стороны злоумышленника. Данная модель угроз дает понять, на какие аспекты необходимо обратить внимание специалисту по безопасности, при построении системы защиты СГУР.

Объект воздействия: Иерархическая структура системы управления. Стратегический уровень управления - решаются задачи целераспределения, определения путей достижения целей, формирования групп, кластеров и структуры строя мобильных роботов.

Характерные угрозы:

- Угроза несанкционированного доступа к системе по беспроводным каналам.
- Угроза подмены данных об узле путем посылки ложных сообщений.
- Угроза деавторизации санкционированного клиента беспроводной сети.
- Угроза перехвата управления процессом кластеризации системой группового управления подвижными объектами.
- Угроза подмены узла, выполняющего роль лидера группы злоумышленным узлом.
- Угроза наличия недекларированных возможностей у одного из роботов.

Воздействие злоумышленника:

Подмена сообщений, нарушение целостности передаваемых данных, компрометация подлинных узлов, атаки, направленные на нарушение процесса кластеризации сети - злоумышленник, сможет реализовывать данные типы атак, внедрившись в сеть или проведя атаку «Человек посередине». Кроме того, даже находясь во внешней сети, злоумышленник сможет повлиять на данный уровень управления, проводя атаки отказ в обслуживании и распределенные атаки, а также кибер-атаки, предусматривающие физическое воздействие.

Объект воздействия: Тактический уровень управления - решаются задачи определения роботом своего целевого положения в структуре слоя, планирование траектории к своему целевому положению в соответствии с данными сенсорной подсистемы и данными от других роботов.

Характерные угрозы:

– Угроза несанкционированного доступа к программно-аппаратному обеспечению роботизированных средств за счет их расположения вне контролируемой зоны.

– Угроза воздействия злоумышленника на параметры окружающей среды.

– Угроза удаленного потребления ресурсов.

– Угроза наличия недекларированных возможностей у одного из роботов.

– Угроза применения методов обратного инжиниринга для получения информации о типе загрузчика, контроллера полетов и протокола загрузчика.

– Угроза модификации прошивки бортового вычислителя с использованием уязвимостей последовательных интерфейсов, обеспечивающих связь между ведущим и ведомым устройствами.

– Угроза нарушения доступности GPS приемника.

Воздействие, которое может оказать злоумышленник:

На данном уровне возможны следующие атаки: злоумышленник может оказывать влияние на показатели сенсорной системы робота, в зависимости от того, какие параметры среды фиксирует робот, оказывая данное влияние злоумышленник может нарушить работу робота или группы роботов, злоумышленник может проводить на атаки на позиционно - траекторное управление, заложенное в контроллере управления полетом или бортовом компьютере.

Объект воздействия: Метод потенциальных полей (Группирование роботов для выполнения целей).

Характерные угрозы:

– Угроза подмены данных об узле путем посылки ложных сообщений.

– Угроза нарушения процесса группового управления путем подмены данных о «зарядах» объектом.

– Угроза несанкционированного доступа к системе по беспроводным каналам.

Воздействие злоумышленника:

Реализация атаки человек посередине. Злоумышленник располагается между узлами сети и управляющим центром и подменяет информацию о «положительных» и «отрицательных» зарядов объектов. Реализация атаки Сибиллы. Злоумышленник представляет несколькими устройствами в сети и пытается перенаправить взаимодействия с другими объектами на себя, либо наоборот пытается разбить сформированные группы путем манипулирования положительными и отрицательными зарядами.

Объект воздействия: Методы централизованного управления - «робот-лидер».

Характерные угрозы:

– Угроза подмены данных об узле путем посылки ложных сообщений.

– Угроза подмены узла, выполняющего роль лидера группы злоумышленным узлом.

Воздействие злоумышленника:

Злоумышленник, внедрившийся в сеть, может посыпать ложные данные о себе, чтобы быть выбранным в качестве лидера и затем нарушить процесс выполнения цели.

Объект воздействия: Централизованная система управления – передача данных по открытым информационным каналам.

Характерные угрозы:

– Угроза несанкционированного доступа к системе по беспроводным каналам.

– Угроза использования слабостей протоколов сетевого/локального обмена данными.

– Угроза деавторизации санкционированного клиента беспроводной сети.

– Угроза подмены содержимого сетевых ресурсов.

Воздействие злоумышленника:

Как правило, роботы общаются по беспроводному радиоканалу, который является достаточно уязвимым. Злоумышленник может реализовывать различные типы атак на беспроводной канал передачи данных: атаки типа отказ в обслуживании и «человек посередине».

Объект воздействия: Централизованный метод группового управления – дублирование лидера группы.

Характерные угрозы:

- Угроза подмены беспроводного клиента или точки доступа.
- Угроза нарушения синхронизации работы между дублированными лидерами группы.
- Угроза создания нескольких сущностей злоумышленником для получения контроля над сетью.

Воздействие злоумышленника:

Атака отказ в обслуживании или перехват управлением на лидера группы или дубликат лидера. Реализация атаки Сибиллы - сетевая атака, при которой один из узлов может иметь несколько идентификаторов, тем самым нарушая работу системы. Став лидером группы, злоумышленник сможет управлять всей сетью, нарушая ее работу.

Объект воздействия: Методы коллективного управления.

Характерные угрозы:

- Угроза несанкционированного доступа к системе по беспроводным канала.
- Угроза искажения информации о целях, передаваемой для составления общей матрицы целей.
- Угроза нарушения итерационного процесса выбора действий и целей узлами группы.

Воздействие злоумышленника:

Реализация атаки дезинформирования, когда злоумышленник посыпает заведомо ложные данные, несоответствующие действительности. Реализация атаки человек посередине и подмена данных, передаваемых подлинными роботами. Реализация атаки отбрасывания пакетов, и исключения узла из процесса формирования матрицы целей. Реализация атаки человек посередине, а также передача излишней информации.

Заключение

В данной статье были рассмотрены основные особенности построения систем группового управления роботами, а также были выявлены основные угрозы, характерные именно для СГУР. Необходимо отметить, что данная модель угроз позволяет определить специалисту, на что необходимо обратить внимание при организации системы защиты. В первую очередь, как можно понять из модели угроз, основная часть угроз направлена на нарушение безопасность каналов передачи данных. Данные, передаваемые по радиоканалу, наиболее уязвимы к перехвату информации, поэтому первым шагом при организации защиты необходимо осуществлять шифрование данных, а также аутентификацию узлов сети. Тем не менее, шифрование не всегда позволяет обеспечить полную защиту данных. К примеру, протокол Wi-Fi, осуществляющий передачу данных по беспроводному каналу использует стандарты для аутентификации и шифрования WEP, WPA/WPA2, тем не менее, данные стандарты достаточно уязвимы к атакам злоумышленника. К примеру, шифрование данных начинается на сетевом уровне, а на канальном уровне данные предаются в открытом формате, таким образом, что злоумышленник может перехватывать информацию о MAC адресах, идентификаторов роутера и др. Если речь идет об открытом радиоканале, то злоумышленник может свободно их перехватывать и получать полную информацию об узлах сети. А также подменять ее и проводить различные активные атаки на сеть. В случае с Wi-Fi сетью, несмотря на наличие шифрования, злоумышленник может перехватывать трафик и пытаться получить ключ. Если ключ имеет небольшую длину или содержит стандартный набор символов, к примеру, только цифры, то злоумышленник может легко его подобрать. А также злоумышленник может быстро подобрать ключ, если обладает достаточно большими вычислительными мощностями. Таким образом, внедрившись в сеть, злоумышленник может проводить большое количество различных активных атак, их спектр достаточно широкий. Одной из таких атак является атака «человек посередине», которая может привести к искажению

передаваемых данных и нарушению процесса выполнения задач. Против такой атаки наиболее эффективными могут быть сертификаты, подтверждающие подлинность узла, а также поддержание цепочки доверия [9].

Рассмотрев основные типы атак и угроз для СГУР, можно сделать вывод о том, что они достаточно уязвимы к воздействию, как стороны внешнего, так и со стороны внутреннего злоумышленника и требуют особого внимания с точки зрения безопасности. Кроме того, необходимо отметить, что стандартные средства обеспечения безопасности не всегда смогут предоставить должный уровень защиты, поэтому целесообразным является разработка новых методов и системы защиты, учитывающих особенностей СГУР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт RoboTrends, статья Алексей Бойко «Обнаружение и противодействие беспилотникам». Режим доступа - <http://robotrends.ru/robopedia/obnaruzhenie-i-protivodyaystvie-bespilotnikam> – свободный (Дата обращения 01.08.2017 г.).
2. Пшихопов В.Х., Соловьев В.В., Титов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В.Х. Пшихопова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. –305 с.
3. Барбашова Т.Ф., Кирильченко, А.А., Колганов, М.А. Некоторые аспекты использования метода потенциалов при управлении мобильными роботами.– М.: Изд-во ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2004.–23 с.
4. Ивченко В.Д., Корнеев А.А. Анализ методов распределения заданий в задаче управления коллективом роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 7. – С. 36 – 42.
5. А.С. Басан, Е.С. Басан, О.Б. Макаревич. Анализ проблем обеспечения безопасности в мобильных автономных робототехнических системах. Материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции и Восьмой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Ростов-на-Дону. 2017. С 75-84.
6. Fiona Higgins, Allan Tomlinson and Keith M. Martin. Threats to the Swarm: Security Considerations for Swarm Robotics. International Journal on Advances in Security, vol 2 no 2&3, year 2009.
7. Tuan Phan Vuong, George Loukas, Diane Gan, Anatolij Bezemsikij: Decision tree-based detection of denial of service and command injection attacks on robotic vehicles. WIFS 2015: 1-6.
8. Сайт Хабрахабр, статья GPS: глушилки, спуфинг и уязвимости. Режим доступа - <https://habrahabr.ru/company/neuronspace/blog/254877/> - свободный (Дата обращения 01.08.2017 г.).
9. Басан Е.С., Макаревич О.Б. An Energy-efficient System of Counteraction against Attacks in the Mobile Wireless Sensor Networks. / International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery/ Xi'an, Shaanxi, China, 2015 г. С. С-403-410.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ КОМПАНИЙ

Аннотация. В данной работе приводится исследование разработки мультиагентных систем на примере концептуального описания и архитектуры Web-приложения, используемого для управления деятельностью в виртуальных организациях. Результаты работы предполагаются для использования в качестве основы для уточнения и дальнейшей разработки системы данного класса. Результатами данной работы является изучение структуры виртуальных организаций, их основные отличия от компаний, использующих традиционные методы проектного управления, разработка состава агентов, а также описание этих агентов, разработка алгоритмов функционирования агентов и их взаимодействия между собой.

Ключевые слова: виртуальная компания, мультиагентные технологии, система мониторинга, управление проектами.

Annotation. In this paper, we present a research about the development of multi-agent systems using a conceptual description and architecture of a Web-application; it was used to manage activities in virtual organizations. The results of the research are intended to be used as a basis for clarifying and further developing the system of this class. The results of this research are the study of the structure of virtual organizations, the main differences between them and companies, which have traditional methods of project management, the development of agents, and the description of these agents, the development of agents' functional algorithms and their interactions among themselves.

Keywords: Virtual company, multi-agent technologies, monitoring system, project management.

XXI век – время массового использования и быстрого развития информационных технологий. Информационные технологии позволяют активизировать и эффективно использовать информационные ресурсы общества, которые сегодня являются наиболее важным стратегическим фактором его развития. Благодаря быстрому совершенствованию нынешних технологий растет конкуренция среди различных компаний. Для того чтобы обеспечить устойчивое развитие компаний, необходимо введение новых усовершенствованных форм организаций, увеличение сложности процессов принятия решений и модернизация систем управления. Таким образом, учитывая растущую популярность сетевого подхода, мы имеем все основания высказать предположение о происходящем в настоящее время кардинальном изменении подходов к организационной структуре.

Во многих отраслях на смену традиционным компаниям приходят, так называемые, «виртуальные организации». Под такой компанией подразумевается предприятие, существующее как корпоративное, некоммерческое, образовательное или иное объединение, не имеющее географического центра и функционирующее через телекоммуникационные средства [1].

С маркетинговой точки зрения цель виртуального предприятия – получение прибыли благодаря максимальному удовлетворению потребителей в товарах путем объединения ресурсов и команды разработчиков различных партнеров в единую систему [7]. Виртуальные предприятия, как правило, ориентируются не на удовлетворение индивидуальных запросов конкретных потребителей, а работают на требования соответствующей ниши рынка, в которой они себя позиционируют [2].

Для удобства сравнения виртуальных и традиционных организаций приведем следующую таблицу. (Таблица 1) [4].

Таблица 1 – Сравнение виртуальных и традиционных организаций

Ключевые отличия	Виртуальное предприятие	Классическое предприятие
Работники организации	Работники - индивидуальные предприниматели	Наёмные работники
Тип организационной системы	Динамичная организационная система	Негибкая организационная система
Способы управления	Управление при помощи ИТ-технологий	Управление при помощи административного ресурса
Временные и пространственные ограничения	Отсутствие таковых ограничений	Ограничение по времени и пространству

Таким образом, для виртуальной компании характерна динамическая и гибкая организационная структура, организация управления производством и персоналом на базе ИТ-технологий, а также отсутствие ограничений по времени и месту реализации деятельности. Часто это очень удобно, так как для создания виртуального предприятия нет необходимости в фиксированном географическом положении, персонал может работать независимо от времени с учетом разницы в часовых поясах.

С практической точки зрения обычному предприятию, например, для разработки и выведения нового товара на рынок требуется привлечение значительных ресурсов. В отличие от него виртуальное предприятие ищет новых партнеров, обладающих соответствующими рыночным потребностям ресурсами, знаниями и способностями, для совместной организации и реализации этой деятельности [5]. Таким образом, выбираются предприятия (организации, отдельные коллективы, люди), обладающие ключевыми компетенциями в форме ресурсов и возможностей для быстрого создания высокотехнологичного продукта без обычных существенных затрат для достижения конкурентного преимущества на рынке.

Исходя из этого, для качественного мониторинга работы над проектом необходимо создание автоматизированной системы, благодаря которой будет возможно управлять проектом. Для традиционной компании достаточно, чтобы эта система обладала следующими функциями:

- она должна хранить всю информацию, связанную с проектом (требования, ТЗ, спецификации, на основании требований, инструментарий, методы, метрики, план работы);
- необходимо постоянное добавление актуальной информации по проекту;
- так же нужно, чтобы вся информация была представлена и в общем виде, и в детальной форме, в соответствие с запросами пользователей;
- должно быть отображено соответствие плана и реальных событий проекта.

Так как в работе речь идет о виртуальных организациях, то добавим следующие требования к мониторинговой системе:

- благодаря мультиагентным технологиям система сама распределяет задачи по разработчикам, синхронизирует их и осуществляет эффективный мониторинг исполнения;

- так же, система должна учитывать часовые пояса, в которых находятся работники компании, так как они могут быть разбросаны по всему миру;
- система должна рассчитывать время для проведения митингов с учетом часовых поясов;
- на основе FMEA-анализа строить прогнозы рисков;
- система должна учитывать технологии связи и безопасности, то есть система санкционированного взаимосогласованного доступа на основе действий агента, отслеживающего безопасность передачи данных по сети Интернет, конфиденциальность, доступность и т. д.

Мультиагентный подход к созданию информационной системы управления проектами. *Мультиагентная система (MAC)* – это система, образованная несколькими интеллектуальными агентами, которые взаимодействуют между собой. В этом случае под *агентом* подразумевается программа, которая сама выполняет какое-либо прописанное задание [3]. Отличительной чертой программного агента является его взаимодействие с окружающей средой. В этом случае мы говорим, как о программной среде, так и об аппаратуре, на которой функционирует агент. Такие агенты постоянно контактируют с окружающей средой, ведут ее мониторинг и так же способны воздействовать на нее, чтобы достичь поставленного результата.

В работе будем пользоваться одним из самых популярных подходов создания MAC – методом «агентов и миров», который заключается в создании *мира деятельности* каждого агента, а также общего мира деятельности.

Здесь под *миром действий* подразумевается некая модель среды деятельности агентов, которая основана на их знаниях, такая система является моделью виртуального пространства, в которой может осуществляться доступ ко всем объектам этого мира для выполнения конечной цели [6].

Для принятия решения в системе агентов используется следующий алгоритм [8]:

1. Задается общая цель, а также обговариваются ресурсы и все ограничения.
2. Все агенты включают процесс восприятия и планирования действий, в это время, загружая мир знаний, в которых строится модель цели. Далее, агент, который первым выполнил эти задания, предлагает свою концепцию.
3. Если это решение удовлетворяет всем ограничениям и ресурсам, а также не возражает планам других агентов, то это решение принимают. В противном случае, агенту необходимо поменять свою концепцию.
4. Далее каждый агент делает свои запланированные действия. Если же на одном из этапов какой-то агент вынужден изменить свою концепцию, то вся система возвращается на этап, который необходимо поменять.
5. В момент, когда поставленная цель достигнута, процесс завершен.

В случае такого алгоритма перебираются все возможные варианты решения проблемы. Время выполнения данного алгоритма зависит от агентов, их интеллектуальных способностей, базы знаний. То есть такой алгоритм является очень сложным и трудоемким для обычного человека, но в тот же момент он является очень эффективным.

Существует множество платформ для разработки мультиагентных систем, но в нашей работе концептуально-функциональная модель будет описана на алгоритмическом языке.

Рассмотрим стадии жизненного цикла проекта на примере абсолютно любой модели [4]:

1. Исследование концепции.
2. Исследование системы.
3. Сбор требований.
4. Реализация проекта.
5. Внедрение.
6. Установка.

7. Эксплуатация и поддержка.

8. Сопровождение.

9. Вывод из эксплуатации.

Исходя из этого, выделим стадии жизненного цикла, которые можно автоматизировать. Таким образом, наша система будет содержать 5 агентов:

- агент распределения задач;
 - агент сбора требований;
 - агент планирования митингов;
 - агент идентификации, расчета и прогнозирования рисков;
 - агент мониторинга завершенности задач.

На рисунке 1 приведем иллюстрацию того, как эти агенты будут функционировать друг с другом, то есть какие данные будут подаваться на вход агенту, а также какие данные агенты будут возвращать после своего функционирования.

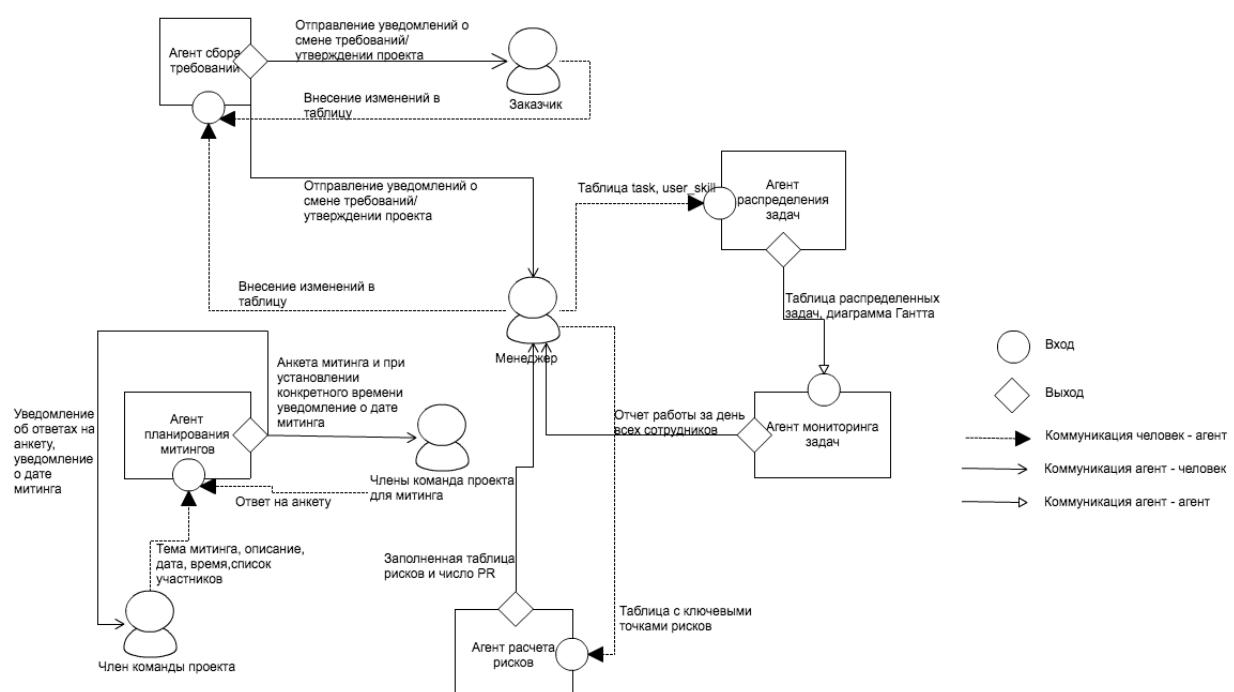


Рисунок 1 – Взаимодействие агентов и участников проекта

Далее опишем каждого из агентов системы.

Агент сбора требований. Обозначим множество значений *possibility* как (C_1, C_2, \dots, C_n) , где n – количество требований, выставленных заказчиком. И введем параметр $\varepsilon = \sum_{i=1}^n C_i / n$. Благодаря этой величине агент будет принимать решение. Такой параметр называется *точкой принятия решения*. Процедуру счета требований назовем *GetRequirement*. Также введем новую процедуру *GetChanges* – это процедура заполнения агентом данных, которые ввел менеджер.

Данные, подающиеся на вход агенту: требования заказчика

Алгоритм функционирования агента:

Procedure Requirement

$\varepsilon_1 := -1; \varepsilon_2 := -1;$

Repeat

Агент отправляет уведомление менеджеру, о том, что заказчик заполнил таблицу

```

GetChanges;
If  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \geq 0$  then
     $\varepsilon_1 := \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n};$ 
        If  $\varepsilon_1 = 1$  then агент выдает сообщение менеджеру проекта и заказчику
        «проект утвержден»;
        End if
        Else if  $\frac{1}{2} < \varepsilon_1 < 1$  then агент отсылает уведомление заказчику: «Просьба
        изменить требования»;
        Заказчик читает комментарии;
        End if
    End if
Else if  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 < 0$  then
    If агент нашел решение в базе решений then агент принимает решение в
    соответствие с базой решений
    End if
    Else if агент не нашел решение в базе решений then агент высылает
    сообщение менеджеру: «необходим митинг»
    End if
End else if
Until  $\varepsilon_1 \neq 1$ 
Отправка сообщения менеджеру и заказчику: «проект утвержден»
End procedure

```

Агент распределения задач. Этот агент используется для эффективного распределения задач между работниками компании. Известно, что обычно в процессе управления проектом, после того, как были собраны требования, написано ТЗ, менеджеру необходимо распределить на всех участников проекта задания, которые они будут выполнять. Так как все разработчики организации также могут быть задействованы и в других проектах, иметь другие задания, а также, если учесть, что мы рассматриваем виртуальную компанию, работники зачастую имеют различные часовые пояса. Таким образом, одному человеку очень тяжело сделать эту процедуру так, чтобы на выходе получилось оптимальное распределение задач по исполнителям.

Решение этой проблемы – это ввод нового агента распределения задач. Данный агент, используя некую базу решений, способность обучаться и некий алгоритм, по которому он будет работать (алгоритм описан ниже), будет решать такую задачу оптимальным образом и в короткий промежуток времени. Таким образом, мы исключаем возможность того, что какие-то разработчики будут загружены больше, чем другие, а также облегчаем работу менеджеру проекта.

Таким образом, на *вход* агент получает таблицу *task* (таблица задач) и таблицу *user_skill* (таблица, в которой хранятся уровни владения навыками каждого пользователя). На *выход* агент должен распределить задачи по разработчикам и составить диаграмму Гантта, которую он передаст агенту мониторинга задач.

Алгоритм функционирования агента

Procedure TaskAgent

GetTasks;

GetTeam;

$i := 1;$

While имеются задачи с состоянием «Ожидание» **do**

Агент берет задачу с номером i

Агент смотрит строку задачи i и столбец Skill

For j **from** 1 **to** M **do**

If процентная сумма владения навыками работника j максимальна
then

If занятость работника позволяет взять задачу исходя из ее даты завершения **and** занятость работника < 10 – сложность задачи **then**

If можно взять работника по такому правилу **then**
агент назначает разработчика на задачу
агент добавляет к занятости разработчика число соответствующее сложности задачи

End if

Else if существует решение в базе решений этого агента
then агент принимает решение в соответствие с базой решений

End if

Else агент отправляет сообщение менеджеру: «необходимо принять решение и внести его в базу решений»

End else

End if

End if

End do

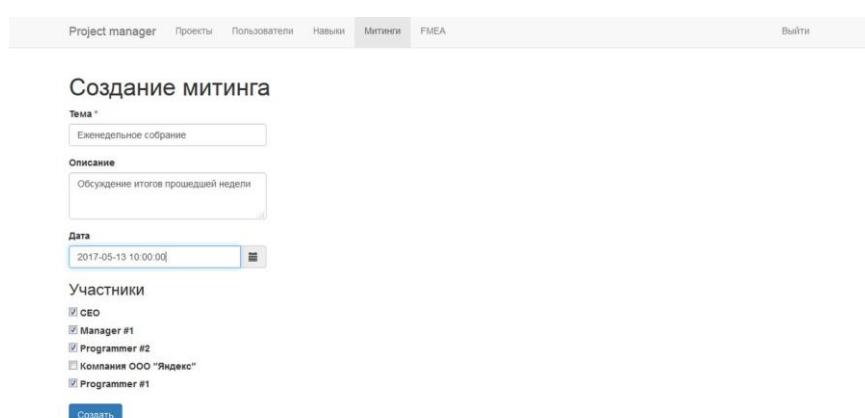
$i := i + 1$

End do

Агент сортирует задачи и строит диаграмму Ганнта

End procedure

Агент планирования митингов. Агент планирования митингов начинает свою работу, когда какому-либо участнику проекта необходимо собрать встречу. Для этого организатору необходимо заполнить следующую форму:



The screenshot shows a web-based application interface for creating a meeting. At the top, there is a navigation bar with tabs: Project manager, Проекты, Пользователи, Навыки, Митинги (which is the active tab), and FMEA. On the far right of the navigation bar is a 'Выход' (Logout) button. Below the navigation bar, the main form is titled 'Создание митинга'. The form fields include:

- Тема ***: Еженедельное собрание
- Описание**: Обсуждение итогов прошедшей недели
- Дата**: 2017-05-13 10:00:00
- Участники**:
 - CEO
 - Manager #1
 - Programmer #2
 - Компания ООО "Яндекс"
 - Programmer #1

At the bottom of the form is a blue 'Создать' (Create) button.

Рисунок 2 – Форма создания митинга

После того, как агент заполняет таблицу *meeting*, он заполняет таблицу *meeting_participants* и всем участникам будущего митинга рассыпается следующая анкета:

Митинг "Еженедельное собрание"

Обсуждение итогов прошедшей недели
Дата : 2017-05-13 12:00:00

Участники

Имя	Возможность участия	Комментарий
CEO	Да	
Manager #1		
Programmer #2		
Programmer #1		

Подтвердите участие

Есть возможность участия

Если нет, укажите причину

Сохранить

Рисунок 3. Анкета планирования митинга

Обозначим процедуру формирования таблицы *meeting_participants - GetTableParticipants*. А также приведем алгоритм работы агента планирования митингов.

Procedure AgentMeeting

GetMeetingTable

Всем разработчикам, находящимся в столбце *user_id* агент рассыпает анкету
Агент считывает анкеты участников

GetTableParticipants

If все участники ответили «Да» **then**

Агент рассыпает всем участникам митинга сообщение: «митинг состоится
Дата в *Время*»

End if

Else

агент отправляет создателю митинга сообщение со списком ответов
агент считывает ответ создателя

агент вносит изменения в базы *meeting* и *meeting_participants*

агент рассыпает сообщение всем участникам митинга сообщение: «митинг
состоится *Дата* в *Время*»

End else

End procedure

Таким образом, на *выходе* агент выдает конечный список участников, время и дату митинга, а также рассыпает эту информацию по всем участникам встречи.

Агент расчета рисков. Менеджер задействует этого агента в случае, когда ему необходима помощь в объективной оценке продукта, в понижении вероятности возможных ошибок, выявления их возникновения или же для предоставления организации добавочной информации для анализа сегмента рынка.

Таким образом, на *вход* этому агенту подается таблица, в которой менеджер указывает ключевые элементы, в которых возможно появление ошибки. Процедуру считывания агентом таблицы обозначим как *GetTableFMEA*.

Определим каждый столбец таблицы, которую заполняет агент (рис. 4): *Item* – это те ключевые элементы, в которых возможно возникновение ошибки, *Failure Mode* – это виды отказов системы, *Effects of FM* – это возможные последствия от этих ошибок, *Severity* – тяжесть последствий, *Causes of FM* – потенциальные причины возникновения ошибок, *Occurrence* – рейтинг того, на сколько вероятно появление этой ошибки, *Control Methods* – методы, благодаря которым можно производить контроль этого элемента, *Detection* – рейтинг обнаружения ошибки и *PR* – риск, который вычисляется при помощи формулы для FMEA-анализа.

На выходе агент должен выдать заполненную таблицу (рис 4).

The screenshot shows a software interface for FMEA analysis. At the top, there is a navigation bar with tabs: Project manager, Проекты, Пользователи, Навыки, Митинги, FMEA (which is selected and highlighted in grey), and Выйти. Below the navigation bar is the title "FMEA". The main area contains a table titled "FMEA" with columns: Item, Failure Mode (FM), Effect of the FM, Severity (\$), Causes of the FM, Occurrence (O), Control Methods, Detection (D), and Risk Priority Number (RPN). There are three rows of data in the table:

Item	Failure Mode (FM)	Effect of the FM	Severity (\$)	Causes of the FM	Occurrence (O)	Control Methods	Detection (D)	Risk Priority Number (RPN)
Item #1	FM #1	Effect #1	4	Cause #1	4	Method #1	7	112
Item #2	FM #2	Effect #2	7	Cause #2	3	Method #2	5	105
Item #3	FM #3	Effect #3	2	Cause #3	6	Method #3	2	24

Below the table are two buttons: "Добавить строку" (Add row) and "Рассчитать" (Calculate).

Рисунок 3 – Заполненная таблица FMEA – анализа

Алгоритм работы агента

Procedure FMEA

GetTableFMEA

While в таблице есть элементы с невычисленным числом риска потребителя **do**

If в таблице стандартных решений есть текущий элемент **then** агент заполняет оставшиеся поля в соответствие с таблицей стандартных решений

$PR := S * O * D$

End if

Else Агент уведомляет менеджера об обнаружении элемента, отсутствующего в стандартной таблице

End else

End do

Агент уведомляет менеджера о возможных рисках

End procedure

Агент мониторинга задач. Этот агент отвечает за то, чтобы все задачи, которые до этого отсортировал агент распределения задач, были выполнены в сроки. Для того, чтобы велся тщательный контроль работы для этого агента имеется некое хранилище, где по окончанию рабочего дня разработчик обязан разместить написанный им код, а также отчет о проделанной работе, чтобы менеджер имел представление о статусе задачи. То есть, после того, как на *вход* этому агенту были переданы следующие данные: диаграмма Гантта, таблица *task*, агент начинает свою работу. Обозначим процедуру считывания данных из базы *task* - *GetTasks*, процедура считывания диаграммы Гантта - *GetDiagram*, а процедура считывания хранилища *task_report* – *GetStorage*. На выходе работы агента мы получаем ежедневно обновляющуюся базу, в которой отображается текущее состояние каждой задачи проекта. Алгоритм функционирования агента следующий:

Procedure TaskMonitoringAgent

GetStorage

GetDiagram

GetTasks

While есть задача в состоянии «Активна» **do**

Агент берет задачу с состоянием «Активна»

If deadline задачи сегодня **then**

If член команды сдал отчет о завершении задачи **then**

Агент изменяет состояние задачи на «Выполнена»

Агент вычитает из занятости разработчика сложность задачи

Break

End if

```

Else
    If в базе решений агента есть решение then
        Агент поступает в соответствие с базой решений
        Агент удаляет задачу из очереди на сегодня
    End if
    Else
        Менеджер принимает решение и вносит его в базу решений
        Агент удаляет задачу из очереди на сегодня
    End else
End else
End if
Else
    If есть прогресс по задаче then
        Агент убирает задачу из очереди на сегодня
    End if
    Else
        If до конца рабочего дня осталось менее 30 минут then
            Агент отправляет члену команды о необходимости отправить код/отчет в
            хранилище
            Агент уведомляет менеджера проекта
        End if
        Else переносим задачу в конец очереди
        End else
    End else
End else
End do
    Агент отправляет менеджеру полный отчет
End procedure

```

Заключение

Проблема управления является на данный момент одной из самых актуальных. Помимо её проявления в окружающей жизни, с ней сталкиваются абсолютно все организации. Именно поэтому мы выбрали данную тему. Управление в виртуальных компаниях осуществляется более сложно, чем в традиционных организациях.

В ходе нашей работы мы проанализировали и определили отличия классических и виртуальных организаций, исходя из чего, можно сделать вывод о сложности мониторинга. Виртуальные компании являются новым видом деятельности организаций, которые на данный момент только набирают популярность. Также очень актуальным является создание и освоение мультиагентных систем. Именно новизна стала причиной ряда сложностей. Мы выполнили обзор теоретических работ, чтобы приблизиться к пониманию мультиагентного подхода. Данная сфера деятельности является передовой в текущий период времени и на некоторые вопросы ответов еще просто не найдено, что может являться предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уорнер, М. Виртуальные организации. Новые формы ведения бизнеса в XXI веке/М. Уорнер, М. Витц, М. – Добрая книга, 2005
2. Кияев, В. И. О терминологии и требованиях международного стандарта качества разработки программного обеспечения. //В сб. «Системное программирование» (под ред. проф. А.Н.Терехова), С.-Петербург. ун-та, 2004
3. Скobelев, П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений/ / Автометрия. – 2002. № 6.

4. Роберт Т. Фатрелл. Управление программными проектами/ Роберт Т. Фатрелл, Дональд Ф. Шафер, Линда И. Шафер, Вильямс, 2004. – 1136 с.
5. Ройс, У. Управление проектами по созданию программного обеспечения. Унифицированный подход/ У. Ройс. – М.: Лори. – 2002 – 424 с.
6. Leyton-Brown K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic and Logical Foundations/ Leyton-Brown K., Shoham Y., London: Cambridge University Press. – 2009. — pp. 513
7. Bourque, P. SWEBOK v3.0. Guide to the Software Engineering Body of Knowledge/ P. Bourque, Richard E. Fairley, IEEE, 2014 – pp. 335.
8. Чекинов, Г. П., Чекинов, С. Г. Применение технологии многоагентных систем интеллектуальной поддержки принятия решения// Системотехника, 2003. – №1

КОНСТРУИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МНОЖЕСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛОХО ФОРМАЛИЗУЕМЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Аннотация. Рассматривается математическая постановка задачи для плохо формализуемых объектов, описание которых является неполным и содержит неизвестные фрагменты описаний в системах дифференциальных или разностных уравнений, отвечающих за динамическое развитие объекта во времени. Строится система управления на базе замены неизвестных описаний их оценками и дальнейший синтез системы управления на базе метода АКАР и функций Ляпунова. Рассматривается вопрос построения системы множественного управления как коллектива частных систем управления, параметризованных оценками неизвестных компонент описания. Итоговый алгоритм управления реализован композицией базовых управлений, построенной на основе алгебраического подхода к построению корректных алгоритмов и апробирован на ряде прикладных задач управления объектами с неполным описанием. Рассмотрены две прикладные задачи управления экономической направленности. Результаты численного моделирования основаны на данных реальных объектов.

Ключевые слова: плохо формализуемый объект, метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов, нелинейная адаптация на многообразии, идентификация состояний, множественное управление, композиция алгоритмов управления.

Annotation. We consider the mathematical formulation of problem for objects with incomplete description containing unknown fragments in system of differential or difference equations that are responsible for object functioning in time. A control system based on substituting of unknown descriptions their estimates and further synthesis of control system based on the method of analytical design of aggregated regulators and Lyapunov functions is being constructed. The problem of constructing a multiple control system as a collective of local basic control systems parametrized by estimates of unknown description components is considered. The final control algorithm is implemented by a composition of basic controls built on the basis of an algebraic approach to the construction of correct algorithms and is verified on the economic data. The results of numerical modeling are based on real objects data.

Keywords: a poorly formalized object, method of analytical construction of aggregated regulators, nonlinear adaptation on a manifold, identification and estimation of states, multiple control, collective of control algorithms.

Введение. Как известно, для нелинейных n -мерных ($n \geq 1$) объектов имеют место все характерные особенности так называемых сложных объектов, а именно: невозможность полного аналитического описания; параметрическая взаимозависимость; наличие хаотических режимов; нестационарность параметров модели (объекта); «нетерпимость» к управлению; частичная и/или условная воспроизводимость экспериментов. Реальные экономические объекты [1, 2] также обладают всем набором указанных свойств.

В докладе рассматривается задача построения корректного алгоритма управления (то есть более надежного из фиксированного класса алгоритмов) для объектов, часть описания которых неизвестна. С этой целью применяется алгебраический подход [3] к построению корректных алгоритмов над некорректными задачами, традиционно применяемый в интеллектуальном анализе данных и исторически связанный с теорией распознавания образов.

Далее по тексту не будем делать различия между моделью управления и алгоритмом, применяемым для его конструирования, если это не искажает смысл текста.

Под корректностью модели управления будем понимать такое управление $u(t)$, которое по ряду апостериорных характеристик, снимаемых до момента t с наблюдаемых показателей, будет «наилучшим» на множестве имеющихся вариантов управления, называемых базовыми.

Предполагается, что совокупность базовых (частных) управлений может быть построена любым из имеющихся методов синтеза нелинейных регуляторов, допускающих аналитическое описание цели регулирования (управление в скользящем режиме, бэкстеппинг, по алгоритму аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР)). Здесь будет обсуждаться случай применения АКАР для этой цели в силу его привлекательности для решения задач управления объектами, описание которых не является полным (см., например, [4]). В силу того, что ниже решается прикладная экономическая задача с описанием в виде системы ОДУ 3-го порядка, напомним схематично основные положения алгоритма [5] именно для такого объекта:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, x_3) + u_1, \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, x_3), \\ \dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + u_2, \end{cases} \quad (1)$$

где $x \in R^3$ – вектор состояний, $x = (x_1, x_2, x_3)$, $u \in R^2$ – вектор переменных управления, $f \in R^3$ – нелинейная вектор-функция $f = (f_1, f_2, f_3)$, компоненты которой f_1, f_3 неизвестные ограниченные функции. Ставится классическая задача управления выводом объекта (1) из фиксированного начального состояния в заданное $\psi(x_1, x_2, x_3) = 0$, $\psi = (\psi_1, \psi_2)$.

Алгоритм 1 управления для объекта с неполным описанием состоит на первом этапе в выполнении следующих преобразований [5]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1 + u_1, & \dot{x}_1 &= f_1 \pm \hat{f}_1 + u_1, & \dot{x}_1 &= \hat{f}_1 + (f_1 - \hat{f}_1) + u_1, & \dot{x}_1 &= \hat{f}_1 + \eta_1 v_1 + u_1^A, \\ \dot{x}_2 &= f_2, & \Rightarrow \dot{x}_2 &= f_2, & \Rightarrow \dot{x}_2 &= f_2, & \Rightarrow \dot{x}_2 &= f_2, \\ \dot{x}_3 &= f_3 + u_2, & \dot{x}_3 &= f_3 \pm \hat{f}_3 + u_2, & \dot{x}_3 &= \hat{f}_3 + (f_3 - \hat{f}_3) + u_2, & \dot{x}_3 &= \hat{f}_3 + \eta_2 v_2 + u_2^A. \end{aligned} \quad (2)$$

В последней системе (2) переменные u_i^A и v_i могут быть интерпретированы, с одной стороны, как АКАР-управления u_i^A , полученные в условиях замены $f_j(\cdot)$ на оценки $\hat{f}_j(\cdot)$, $j = 1, 3$, и дополнительные переменные управления v_i , предназначенные для компенсации возмущений, естественно возникающих при такой замене, соответственно; $\eta_i > 0, i = 1, 2$ – коэффициенты пропорциональности. С другой стороны, итоговая система в (2) может быть интерпретирована как объект управления с возмущениями [4], возникающих от использования в построении регулятора вместо неизвестных составляющих $f_j(\cdot)$ их оценок $\hat{f}_j(\cdot)$, $j = 1, 3$. Как показано в [5], обе эти задачи равносильны.

На втором этапе осуществляется классический АКАР-синтез для системы с вектором состояний $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3)$:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{f}_1 + u_1^A, \\ \dot{\hat{x}}_2 &= f_2, \\ \dot{\hat{x}}_3 &= \hat{f}_3 + u_2^A, \end{aligned} \quad (3)$$

в результате которого получаем АКАР-управление для системы (3), имеющей полное описание:

$$u_i^A = U_i(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \psi_1, \psi_2), i = 1, 2. \quad (4)$$

На следующем шаге определяются управлении ψ_i из условия отрицательности функции Ляпунова, выбранной, например (в задаче стабилизации), в виде $V(t) = 0.5 \sum_{i=1}^2 (\psi_i^2 + \dot{\psi}_i^2)$ для системы, полученной из (2) после подстановки в нее управлений (4).

Так, для простейшей задачи стабилизации со значениями макропеременных $\Psi_1 = x_1 - x_{10}, \Psi_2 = x_3 - x_{30}$, где x_{10}, x_{30} заданные целевые значения, нетрудно убедиться, что производная функции Ляпунова $\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^2 (\psi_i \dot{\psi}_i + \dot{\psi}_i \dot{\psi}_i)$ будет иметь вид:

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^2 \left(\psi_i \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \Psi_i}{\partial x_j} \dot{x}_j + \dot{\psi}_i \dot{\psi}_i \right) = \psi_1 (\eta_1 \psi_1 + \dot{\psi}_1) + \psi_2 (\eta_2 \psi_2 + \dot{\psi}_2) - \omega_1^{-1} \psi_1^2 - \omega_2^{-1} \psi_2^2.$$

Отсюда следует, что управлении ψ_i , определяемые из условия:

$$\dot{\psi}_i = -\eta_i \psi_i, i = 1, 2, \quad (5)$$

обеспечивают требование отрицательности $\dot{V}(t) < 0$. Таким образом, управлении ψ_i из (5) обеспечивают отрицательность производной функции Ляпунова $\dot{V}(t) < 0$ и, тем самым, гарантирует вместе с законом (4) выполнение всех целевых установок задачи управления для плохо формализованного объекта (1), а именно: 1) решение вариационной задачи $\Phi = \int_0^\infty (\psi_i^2 + \omega_i^2 \dot{\psi}_i^2) dt \rightarrow \min$, $\omega_i > 0, i = 1, 2$ при ограничении $\psi = 0$ или, что то же самое, достижение целевого множества $\psi = 0$ в смысле $\Phi \rightarrow \min$; 2) асимптотическую устойчивость объекта (1) в окрестности $\psi = 0$.

Мотивирующий пример. Рассмотрев поведение объекта (1) в условиях разных оценочных функций $\hat{f}_j(\cdot), j = 1, 3$ (рис. 1), нетрудно убедиться, что показатели качества управления (максимальные и усредненные амплитуда и длительность переходных процессов, энергетические затраты на управление, характер поведения объекта в установившемся режиме) будут зависеть от вида оценок $\hat{f}_j(\cdot), j = 1, 3$ неизвестных функций $f_j(\cdot), j = 1, 3$.

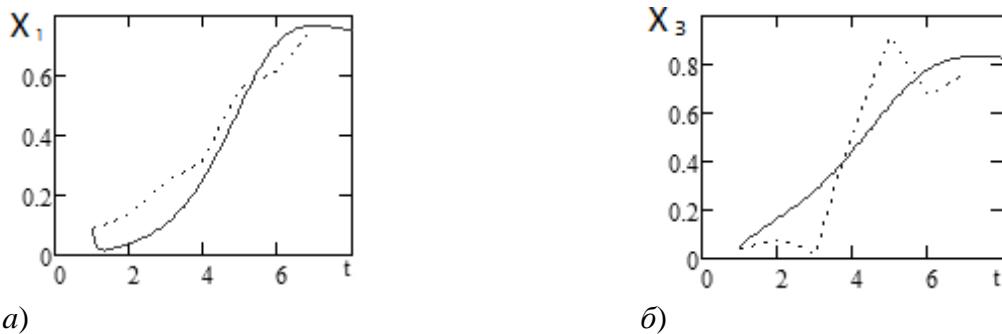


Рисунок 1 – Примеры разной аппроксимации реальных данных в разомкнутой системе (1)
($u_1 = u_2 = 0$)

Результаты численного моделирования управляемых объектов разных порядков, согласно алгоритму 1, свидетельствует о том, что целевое множество достигается при «любой» допустимой

оценочной функции при условии $|\hat{f}_j - f_j| < \infty$, $j = 1, 3$, но «цена» соответствующих управлений будет разная.

Постановка задачи построения множественного управления с учетом апостериорной информации. Остановимся на случае векторного управления для объекта (1), не ограничивая общность. Пусть имеется некоторое конечное множество пар оценочных функций $F = \{\hat{f}_1^{(j)}, \hat{f}_3^{(j)}\}_{j=1,\bar{k}}$ для аппроксимации фрагментов неизвестных описаний f_1, f_3 в правой части уравнений (1). Согласно алгоритму 1, множество оценок F порождает совокупность базовых алгоритмов конструирования управлений $\{A_j\}_{j=1,\bar{k}}$ и моделей управлений $\{U_j\}_{j=1,\bar{k}}$, в каждой из которых используется j -я пара оценочных функций $(\hat{f}_1^{(j)}, \hat{f}_3^{(j)})$ вместо описаний f_1, f_3 . Обозначим через $U_j(t)$ j -ю модель управления, активную в момент времени t , что означает следующее: управление $u(t)$, которому подвергается объект в момент времени t , вычисляется по алгоритму A_j , то есть является оптимальным в смысле известного критерия АКАР-метода $\Phi^{(j)} = \int_0^2 (\omega_{i,j}^2 \dot{\psi}_{i,j}^2 + \psi_{i,j}^2) dt \rightarrow \min, 0 < \omega_i < \infty$, где дополнительный индекс j указывает на использование алгоритма A_j .

Ставится задача нахождения такой политики (множественного) управления, основанной на апостериорной информации к моменту времени t и выборе модели управления из имеющегося множества алгоритмов $\{A_j\}_{j=1,\bar{k}}$, что в каждый момент времени на объект воздействует оптимальное в определенном смысле управление, обладающее «лучшими» качествами по сравнению с отдельным управлением из заданного множества допустимых управлений.

Алгоритм 2 построения множественного управления. Для решения задачи построения корректного коллектива управлений применим алгебраический подход к получению корректных алгоритмов и технику динамических композиций, основанную на нем [3, 6]. Идея указанного подхода восходит, по-видимому, к трудам Шеннона («надежные схемы из ненадежных реле») и Неймана («надёжная система из ненадёжных элементов»).

Шаг 1. Применяем алгоритм 1 для построения множеств моделей управления $\{U_j\}_{j=1,\bar{k}}$.

Шаг 2. Определяем показатели эффективности системы управления $C_k^{(j)}(t)$, где $C_k^{(j)}(t)$ - значение k -го показателя качества для j -й модели управления в момент времени t , отражающего k -ю апостериорную характеристику. Набор показателей качества управления определяется экспертом и может включать величины $\sum_{i=1}^m |\psi_i^{(j)}(t)|$, $\max_t \{|\psi_1^{(j)}(t)|, \dots, |\psi_m^{(j)}(t)|\}$,

$\left(\sum_{i=1}^m |\psi_i^{(j)}(t)|^2 \right)^{1/2}$, m – размерность векторного управления.

Шаг 3. Вычисляем весовые коэффициенты $\rho_k(t, \tau, s)$ частных критериев с учетом «горизонта памяти» $(\tau, t]$ (если $\tau = 0$, то операция скаляризации частных показателей производится на промежутке $(0, t]$). Содержательно, коэффициент $\rho_k(t, \tau, s) \in [0, 1]$ означает

текущее значение «уровня доверия» к активному управлению $U_j(s), s \in (\tau, t]$; величина τ характеризует размер горизонта запоминания показателей качества управления $C_k^{(j)}(t)$, например, $\rho_k(t, \tau, s) = \sigma_k^{t-s+1}, \sigma_k \in [0, 1]$.

Шаг 4. Вычисляем итоговый показатель эффективности по формулам:

$$K_D^{(j)}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{s=\tau}^t \rho_k(t, \tau, s) C_k^{(j)}(s), \quad (6)$$

$$K_C^{(j)}(t) = \sum_{k=1}^K \int_{\tau}^t \rho_k(t, \tau, s) C_k^{(j)}(s) ds,$$

для дискретного и непрерывного управлений, соответственно.

Шаг 5. Принимаем решение относительно номера модели управления, претендующего на роль активного управления в момент времени t по правилу:

$$u(t) = \sum_{j=1}^k \chi_j U_j(t), \quad \chi_j = \begin{cases} 1, & j = J(t), \\ 0, & j \neq J(t), \end{cases} \quad J(t) = \arg \min K^{(j)}(t). \quad (7)$$

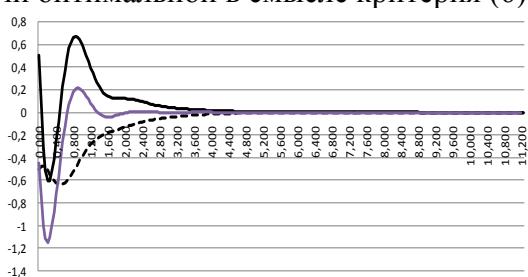
Согласно алгебраической теории синтеза корректных алгоритмов, управление, получаемое по формуле (7), называется корректной композицией базовых управлений $\{U_j\}_{j=1, \dots, k}$, то есть обеспечивающей наилучшее качество процесса управления.

Решение прикладной задачи. Пусть 3-х мерный объект описывает экономические процессы в деятельности некоторого предприятия (см., например, статьи Шаповалова В.И. в [2]) в условиях неопределенности (1) (темы исследования магистерских диссертаций (г. Томск, 2017) по данным бухгалтерской отчетности для компьютерной фирмы и аэропорта, соответственно). Положим в описании (1) x_1, x_2, x_3 – переменные, содержательно выражающие затраты на число сотрудников, текущую величину капитала, затраты на внедрение новых технологий (или кредита), соответственно.

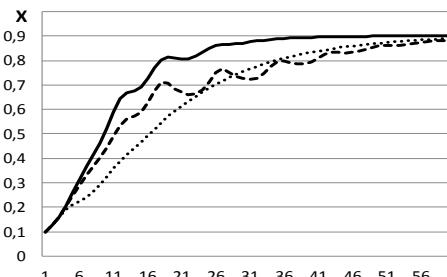
Понятно, что для временных наборов реальных значений показателей $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ за отчетный период может быть построено некоторое множество кривых, аппроксимирующих закон изменения реальных показателей x_1, x_2, x_3 . Применяя алгоритм 2 с критерием качества j -й модели управления вида:

$$K_C^{(j)}(t) = \int_{\tau}^t \sigma^{t-s+1} \left((\psi_1^{(j)}(s))^2 + (\psi_2^{(j)}(s))^2 \right) ds, \quad \sigma \in [0, 1]. \quad (8)$$

Можно убедиться, что существует явная зависимость качества переходных процессов от типа используемой аппроксимации (рис.2), а также единственная кривая, являющаяся для данной задачи оптимальной в смысле критерия (6) или (7).



a)



б)

Рисунок 2 – Влияние вида аппроксимирующих функций \hat{f} на качество переходных процессов в системе 2-го порядка а) $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = f_2 + u$; б) в системе 3-го порядка (1)
 при $f_2 = \mu(x_2 + x_3) - \beta x_1 x_3; \mu, \beta = const$

Итоговая система управления, построенная по алгоритму 2, позиционируется как система с множественной моделью управлений, имеющих разную силу в разных областях фазового пространства. Следует отметить, что в [7] рассматривалась задача адаптивного управления с множественными моделями, возникающими при линейной параметризации исходного нелинейного объекта. Предложенный здесь подход реализует синтез системы управления в нелинейной постановке задачи, что является определенным расширением возможностей множественного управления, так как существует множество реальных объектов, для которых линеаризация не является желательной.

Заключение

Результаты работы могут быть полезны при решении следующих задач: разработка систем поддержки принятия решений при решении задач управления; применение системы интеллектуального управления; синтез систем управления для плохо формализуемых объектов с присущими им процессами, которые затруднительно предусмотреть в модели (параметрические флуктуации, накопленная ошибка округления при оцифровке сигнала, ошибки измерений).

Автор благодарит магистрантов Дубину Н.Д. (ТГУ) и Силаеву А.Н. (ТУСУР) за проведение численного моделирования.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ № 17-08-00920

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dr. Wei-Bin Zhang. Synergetic Economics. – Springer, Berlin, 1991. - 246 p.
2. Колесников А.А. Синергетика и проблемы теории управления: сборник научных трудов /Под ред. А.А. Колесникова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.
3. Журавлев Ю.И. Корректные алгебры над множествами некорректных (эвристических) алгоритмов. I-III // Кибернетика. - 1977. - № 4. - С. 5-17, 1977. - № 6. - С. 21-27, 1978. - № 2. - С. 35-43.
4. Колесников А. А., Кобзев В.А. Динамика полета и управление: синергетический подход. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. - 2009. – 198 с.
5. Колесникова С.И. Алгоритм синтеза системы управления многомерным плохо формализуемым объектом // Известия ЮФУ. - Технические науки. - №5. - 2015. - С. 211–220.
6. Воронцов К.В., Егорова Е.В. Динамически адаптируемые композиции алгоритмов прогнозирования // Искусственный Интеллект. – № 10. - 2006. – С. 277–280.
7. Narendra K. S., Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1997. – Vol. 42. - No. 2. – Pp. 171–187.

Кумов Антон Михайлович (1), Кумова Дарья Михайловна (2)

1. Южный федеральный университет
2. НКБ «МИУС» Южного федерального университета

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫБОРОВ НА ИЗБИРАТЕЛЬНОМ УЧАСТКЕ

Аннотация. В данной статье рассмотрено проектирование системы машинного зрения для организации выборов на избирательном участке. Проанализированы технические средства, используемые для голосования в России и других странах. Составлен алгоритм работы системы. Рассмотрены возможные угрозы, которые могут влиять на её работоспособность. Проведено моделирование модуля обнаружения и распознавания штрих кода.

Ключевые слова: штрих код, выборы, машинное зрение, распознавание образов, информационная система, электронное голосование.

Annotation. This article describes the design of a vision system for the organization of elections at the polling station. Analyzed technical means used for voting in Russia and other countries. An algorithm for operation of the system. The possible threats that can affect its performance. The simulation module of the detection and recognition of the bar code.

Keywords: barcode, elections, computer vision, pattern recognition, information system, electronic voting.

Введение

Выборы – важнейший институт современной демократии, одна из главных форм выражения воли народа и его участия в политическом процессе и одновременно способ формирования представительных органов, замещения некоторых высших государственных должностей [1].

Проблема честности и открытости организации выборов актуальна в настоящее время. На организацию и проведение выборов и референдумов выделяются огромные денежные средства из бюджета страны.

Организации выборов в Государственную Думу в 2016 году для бюджета страны обошлись в 14 млрд 745 млн 778 тыс. 600 рублей [2].

Не добросовестные кандидаты или политические силы и блоки в ходе проведения процедуры голосованию применяют различные способы для получения большинства голосов при подведении итогов. Такими способами являются:

- Технология «Карусель».

Метод воздействия на результат голосования, связанный с подкупом избирателя.

Суть «карусели» заключается в передаче избирателю перед входом на избирательный участок уже заполненного избирательного бюллетеня, который избиратель должен опустить в урну для голосования, а новый, чистый бюллетень вынести и обменять у организатора «карусели» на деньги или другие материальные ценности. Чистый бюллетень заполняется и отдаётся очередному избирателю [3].

- Массовыйброс бюллетеней.

Одно из наиболее бесцеремонных и грубых технологий фальсификации. Она заключается в однократном или многократном опускании в избирательную урну некоторого (обычно достаточно большого) числа заранее заполненных бюллетеней [4].

Для предупреждения и устранения нарушений в день голосования на избирательных участках дежурят сотрудники полиции, наблюдатели от кандидатов и члены избирательной комиссии. Злоумышленники используют методы маскировки и отвлечения организаторов выборов, избирателей, находящихся на избирательном участке, и проводят махинации, направленные на искажение результатов выборов. Неоднократно в подтасовке результатов выборов фиксировались нарушения также со стороны наблюдателей и членов избирательных комиссий, предварительно вступивших в договоренность со злоумышленниками.

Проблема открытости и прозрачности проведения выборов актуальна не только при проведении всероссийских выборов, но и при проведении выборов в студенческой среде.

Состояние исследуемого вопроса о применении технических средств для проведения голосования является актуальной темой во многих странах, которые ведут разработки по применению информационных технологий при организации процедуры голосования.

Объектом проектирования является система учета бюллетеней на избирательном участке для проведения выборов и референдумов.

Практическая значимость полученных результатов позволяет применять систему учета бюллетеней при организации тайного голосования на избирательных участках. Данная система позволит повысить доверие избирательного населения страны к процессу организации выборов и подведению итогов голосования.

Возможные угрозы при проведении выборов

День голосования является результатом работы предвыборных штабов политических партий и кандидатов. За день до открытия избирательных участков на территории проведения выборов объявляется «день тишины», когда запрещены любые формы агитации.

За день до голосования возможной угрозой может являться совершение диверсионной группой мероприятий, направленных на нанесение разрушений участку для голосования, с возможным повреждением коммуникаций, обеспечивающих работу объекта, в котором расположен участок для голосования.

В день голосования угрозы могут исходить от членов УИК, наблюдателей, избирателей.

Стоит отметить, 19 июля 2017 года Государственная Дума РФ приняла поправки в Уголовный кодекс РФ о введении уголовной ответственности за незаконную выдачу и получение избирательного бюллетеня или штрафа для избирателя, члена УИК или для организованной группы лиц по предварительному сговору [5].

Использование технических средств при проведении выборов в других странах и России

Информационные системы и телекоммуникационные технологии нашли свое применение при организации электронного голосования в разных странах.

Австрия. Весной 2004 г. федеральное Министерство внутренних дел созвало рабочую группу по проблемам э-голосования (электронное голосование) с целью изучения и составления отчета о его различных аспектах. Первый, юридически незначимый эксперимент с удаленным голосованием был проведен в мае 2003 г. параллельно с традиционным голосованием на выборах в Студенческий Совет в Венском университете экономики и бизнеса (ВУ). За основу была взята система идентификации граждан через электронные id-карты (Bürgerkarte). До дня выборов избирателю необходимо было подать заявку о получении токена, который будет храниться на электронной id-карте. В день выборов избиратель, чтобы подтвердить свое право голоса, предоставляет только лишь токен. В дополнение к этому та же проектная группа провела второй (вновь не являющийся юридически значимым) тест своей системы э-голосования параллельно с традиционным голосованием на президентских выборах 25 апреля 2004 г.

Великобритания. Первые эксперименты по внедрению электронного голосования в Великобритании были начаты в 2001. В ходе них было проведено более 150 pilotных проектов в 100 округах, охвачено 6,4 миллиона избирателей. реализовано 17 централизованных проектов электронного голосования - интернет-киоски, интерактивное телевидение, голосование по телефону, и посредством смс-сообщений. При этом 14 проектов касались интернет-голосования. В рамках их голосование могло осуществляться с любого компьютера с применением персонального пароля, получаемого одновременно с идентификационной получили в специальном консультативном документе, где особо отмечалась их эффективность

Швейцария. Используется полностью автоматизированная система, направляющая избирателя на специализированный сайт. Перед референдумом каждый избиратель может, предъявив паспорт, взять в ближайшем почтовом отделении карточку для электронного

голосования, содержащую уникальный номер, который может совпасть один раз на 5 миллиардов избирателей, и секретный код, скрытый под непрозрачным защитным слоем. На сайте электронного голосования необходимо ввести номер карточки. Только теперь избиратель допускается на сервер, где проводится само голосование: поставить галочки напротив нужных вариантов референдума, ввести секретный PIN-код и данные своего паспорта и получить электронное подтверждение голоса, которое в дальнейшем может быть проверено в администрации кантона [6].

В России при проведении выборов используются комплекс обработки избирательных бюллетеней, приведенный на Рисунок 1.

Комплекс обработки избирательных бюллетеней является техническим средством подсчета голосов и предназначен для автоматизированного приема и обработки бюллетеней для голосования, подсчета голосов избирателей, участников референдума на избирательном участке, участке референдума, ввода данных протокола, которые не подсчитываются КОИБ, проверки контрольных соотношений данных, внесенных в протокол, распечатки результатов голосования (сведений об итогах голосования), протоколов об итогах голосования соответствующей УИК, по каждому виду проводимых выборов, референдума и записи итогов голосования по каждому виду проводимых выборов и референдума, в том числе на внешний носитель информации.



Рисунок 1 – Комплекс обработки избирательных бюллетеней

На выборах в Государственную Думу VII 18 сентября 2016 года в г. Таганроге Ростовской области на 29 избирательных участках использовались Комплексы электронного голосования (Рисунок 2).

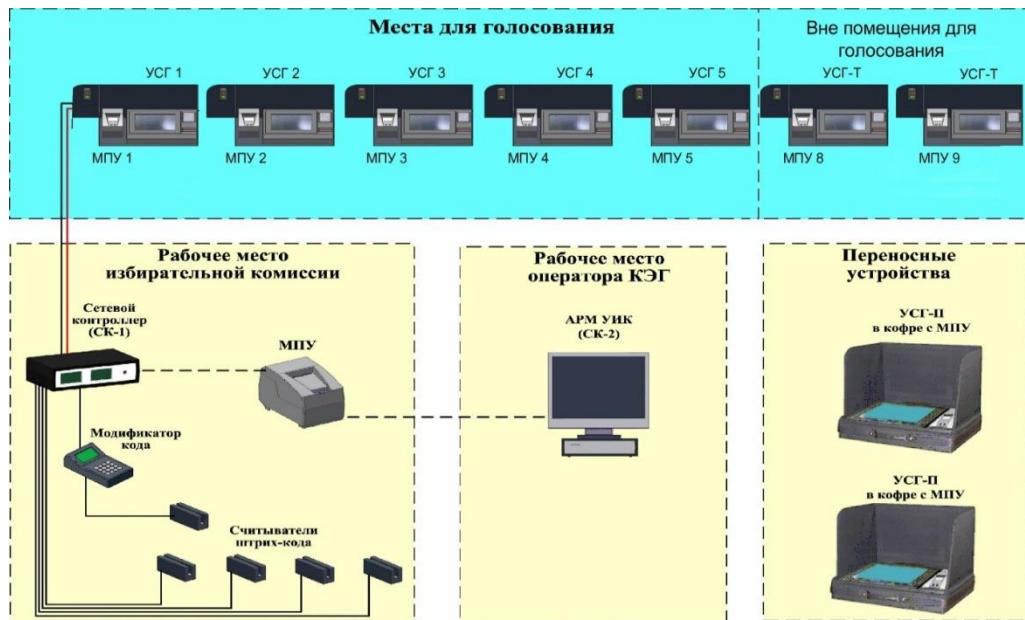


Рисунок 2 – Комплекс электронного голосования

КЭГ – комплекс средств автоматизации ГАС "Выборы", предназначенный для проведения электронного голосования, автоматизированного подсчета голосов избирателей, участников референдума, установления итогов голосования и составления протокола участковой комиссии об итогах голосования.

До начала развертывания КЭГ помещение для голосования должно быть оборудовано необходимым количеством розеток (не менее трех) и удлинителями для подключения устройств КЭГ к электросети.

КЭГ состоит из:

- Устройство сенсорного голосования (УСГ) для голосования на избирательном участке (Рисунок 3);
- Переносное устройство сенсорного (УСГ-П) голосования для проведения голосования вне помещения (Рисунок 4).



Рисунок 3 – Устройство сенсорного голосования КЭГ



Рисунок 4 – Переносное устройство сенсорного голосования КЭГ

В состав одного КЭГ входят стационарные устройства сенсорного голосования – от 2 до 9 устройств, 2 переносных сенсорных устройства, а также два сенсорных устройства – тренажера, которые располагаются перед входом на избирательный участок для обеспечивая возможность для избирателей пройти голосование в тренировочном режиме.

На участке избиратель предъявляет паспорт и получает карточку со штрих кодом. Прикладывая ее к считывателю на сенсорном устройстве, он получает доступ к электронному бюллетеню. Штрих-код на карточках создается и печатается с использованием специальной программы, которая использует генератор случайных чисел. Карточка может быть использована только один раз и только на определенном избирательном участке, воспользоваться ей повторно невозможно.

Алгоритмы и интерфейсы экраных форм устройств сенсорного голосования исключают случайный пропуск избирателем какого-либо из электронных бюллетеней в процессе голосования.

В КЭГ используется система дублирующей печати на бумажном носителе: выбор избирателя фиксируется на контрольной ленте индивидуального печатающего устройства, которая доступна только самому избирателю в момент голосования. По ней голосующий может убедиться, что его голос учтен корректно. После подтверждения избирателем своего выбора лента прокручивается автоматически, и результат волеизъявления выходит из поля видимости следующего голосующего.

Переносные устройства сенсорного голосования в составе КЭГ обеспечивают голосование вне помещения избирательного участка. В них реализованы дополнительные возможности для слепых и слабовидящих избирателей: устройства оснащены азбукой Брайля и наушниками для голосового сопровождения.

Для увеличения использования КЭГ требуется внесение изменений в законодательство о выборах. На настоящий момент существует ограничение по применению комплексов: общее количество участков, где проводится электронное голосование, не должно превышать одного процента от числа участков, образованных на территории, на которой проводятся выборы (референдум) [7].

В России есть уже наработанный опыт по внедрению информационных технологий в процесс организации и проведения выборов. Однако, стоит отметить, что ограничено количества использования КОИБ и КЭГ для проведения выборов.

Информационные технологии нашли свое применение в системах, направленные на организацию открытого и достоверного процесса голосования. По данным Центральной избирательной комиссии Российской Федерации на 16 сентября 2016 года на 96,7 тысячи избирательных участках на территории России организовано для проведения голосования в Государственную Думу Федерального Собрания Российской Федерации седьмого созыва. 365 участков работали на территории 145 иностранных государств [8].

Информационно-коммуникационные системы, обеспечивающие электронное голосование не должны вызывать у избирателей разных возрастов сложностей в работе с ними. Сложности в работе с КЭГ в Таганроге возникали у избирателей преклонного возраста, не доверяющим электронным системам, и не использующим современные технологии в своей жизни.

Сканер КОИБ при распознавании бюллетеня может допустить ошибку и распознать более двух отметок в областях для голосования – принять точку или посторонний объект (человеческий волос, ушная сера, частички мусора) за отметку. В дальнейшем признать данный бюллетень не действительным, тем самым не учесть голос избирателя.

Теоретическое построения системы учета бюллетеней с описанием принципа работы

Система учета бюллетеней на избирательном участке зависит от типа избирательного участка, который зависит от количества избирателей и места его расположения.

На избирательных бюллетенях содержится специальный штрих код, который содержит информацию об участке, к которому он принадлежит, для дальнейшей регистрации и идентификации его в системе учета бюллетеней.

Для регистрации в системе бюллетеней, содержащих штрих коды, используется СШК (считыватель штрих кода), который подключен к персональному компьютеру УИК, содержащем базу данных внесенных избирательных бюллетеней.

СШК установлен на урне для голосования, в которую опускаются бюллетени избирателями после проведения процедуры голосования в специально отведенном месте. СШК на урне регистрирует штрих код, содержащийся на бюллетени, и передает информацию в базу данных, содержащую информацию о зарегистрированных штрих кодах. При совпадении информации на мониторе, находящемся в помещении для голосования происходит отображение информации о количестве проголосовавших на данном участке. Данная информация полезна для избирателей, т.к. после совершения голосования они могут наблюдать изменения о явке, для наблюдателей – будет доступна информация о количестве проголосовавших, для дальнейшего сравнения при подведении итогов, а для УИК оперативно передавать данные о ходе голосования в ТИК.

При обнаружении штрих кода, который не зарегистрирован в базе бюллетеней УИК, происходит оповещение членов УИК и сотрудников МВД, находящихся на участке, для предотвращения попытки срыва хода голосования и фальсификации результатов.

При попытке совершения злоумышленником противоправных действий, а именно попытка вбросить в урну для тайного голосования избирательный бюллетень не принадлежащего к данному избирательному участку (вынесенному из другого участка или подделка бланка бюллетеня) система предупредит звуковым сигналом об ошибке.

При обнаружении бюллетеня, не зарегистрированного на избирательном участке, при попыткеброса или при подсчете голосов позволит определить с какого избирательного участка был вынесен бюллетень.

Маркирование штрих кодами избирательные бюллетени облегчит для членов участковых избирательных комиссий подсчет итогов голосования, т.к. в системе будет фиксироваться количество зарегистрированных бюллетеней для голосования, количество выданных и количество бюллетеней, оказавшихся в урне для голосования.

Участковые избирательные комиссии при организации выборов зачастую сталкиваются с проблемами разделения бюллетеней в зависимости от уровня проведения выборов. Так, например, 18 сентября 2016 года избиратель в Ростовской области мог получить три бюллетеня: два для выборов в Государственную Думу по федеральному и одномандатному избирательным округам, один для выборов депутатов сельских поселений.

Нововведением данной избирательной компании стало то, что на выборах депутатов сельских поселений избиратель мог проголосовать за нескольких кандидатов, которые внесены в избирательный бюллетень.

В избирательных бюллетенях в Государственную Думу избиратель отдать свое предпочтение только за одного кандидата по одномандатному избирательному округу, и один голос за партийный список по федеральному избирательному округу.

В случае, если избиратель голосовал по открепительному удостоверению, то количество бюллетеней, получаемых для голосования зависят от места выдачи открепительного удостоверения.

Структурная схема, функциональные блоки и алгоритм работы системы учета бюллетеней на избирательном участке

Система учета бюллетеней на избирательном участке состоит из отдельных устройств, которые соединены между собой соединительными кабелями для передачи информации от одного устройства к другому. Структурная схема системы приведена на Рисунок 5.

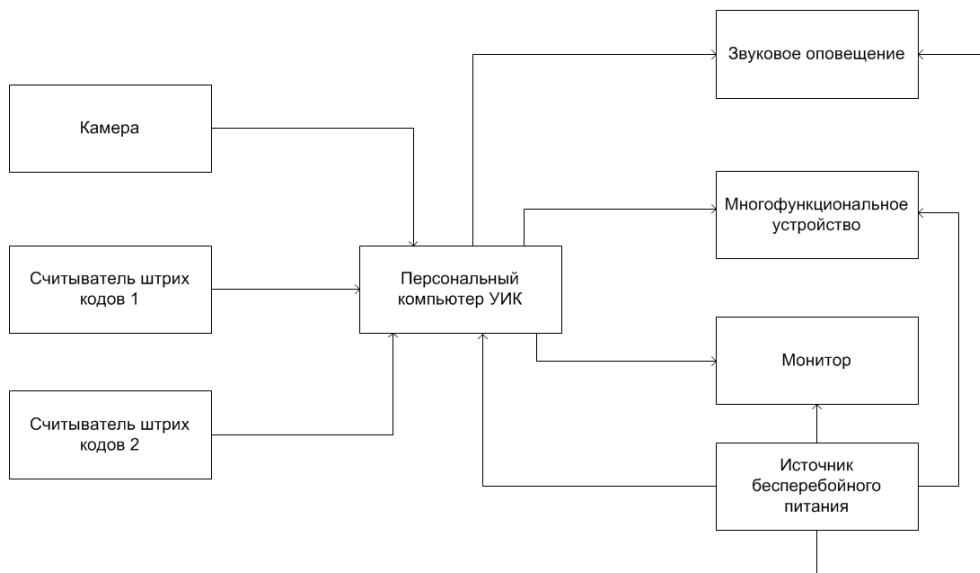


Рисунок 5 – Схема структурная

Отличительной особенностью от аналогов является использование штрих кодов для маркирования избирательных бюллетеней, с помощью которых будет происходить отслеживание перемещения бюллетеней в день голосования.

Таким образом будет использоваться стандартный бюллетень для голосования, на оборотной стороне которого будет содержаться маркированная отметка для регистрации бюллетеня в системе.

На Рисунок 6 приведена функциональная схема системы учета бюллетеней на избирательном участке.

Блок генерации штрих кодов – служит для генерирования штрих кодов для маркирования в последующем избирательных бюллетеней. Информация о сгенерированных штрих кодах хранится в блоке базы данных.

Печать штрих кодов происходит с помощью блока печати штрих кодов (многофункционального устройства принтера) на специальной клейкой бумаге.

С помощью СШК изображение штрих кода попадает в блок получения изображения. Далее с помощью блока распознавания штрих кода происходит декодирование информации содержащейся в штрих коде, которая переводится из графической в численно-буквенную в блоке получения данных.

Далее полученная информация отправляется в блок принятия решений, где происходит сравнение полученных данных, с данными в базе данных. При совпадении данных – на блоке вывода информации происходит отображение данных для избирателя о том, что он совершил процедуру голосования и его бюллетень находится в урне для голосования. В случае, если происходит несовпадение данных – обнаружен бюллетень не принадлежащий избирательному участку, то в данном случае система повещает членов УИК, сотрудников МВД, наблюдателей о том, что произошла попытка срыва для искажения результатов голосования.

Оповещение происходит посредством аудиоаппаратуры, установленной на избирательном участке. При помощи камеры, расположенной напротив урны для голосования происходит фото-видеосъемка попытки нарушения процесса голосования.

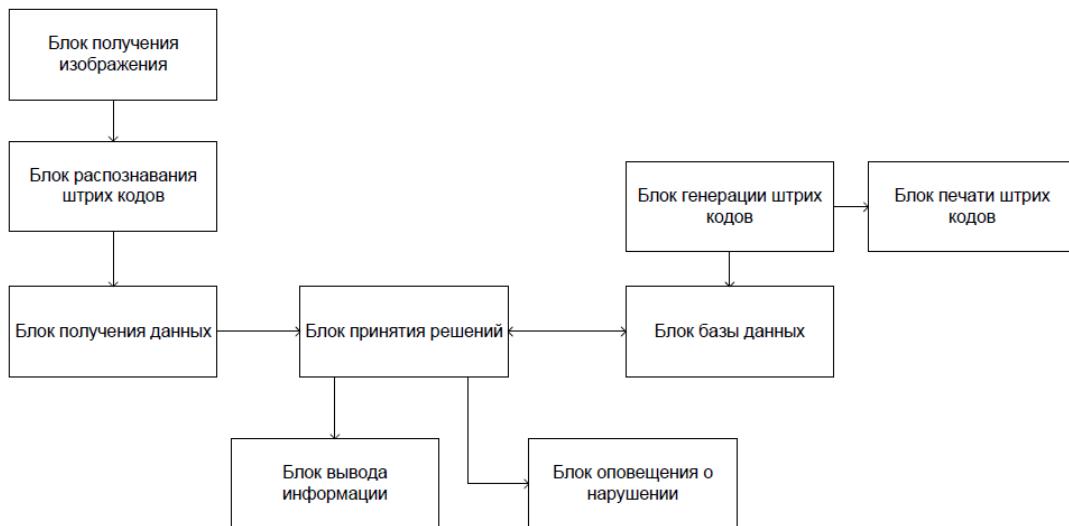


Рисунок 6 – Схема функциональная

Алгоритм работы системы учета бюллетеней на избирательном участке состоит в следующем:

1. За день до голосования генерируются штрих коды с помощью программы, данные о штрих кодах заносятся в базу данных;
2. Штрих коды для маркирования бюллетеней изготавляются с помощью многофункционального лазерного устройства на клейкой бумаге для нанесения на оборотную сторону бюллетеня;
3. В день голосования всем избирательным бюллетеням в базе данных присваивается статус «НЕ ВЫДАННЫЙ»;
4. В случае выдачи бюллетеня избирателю – он регистрируется членом УИК с помощью СШК-1. В этом случае бюллетеню присваивается статус «ВЫДАН»;
5. При опускании бюллетеня в урну для голосования происходит его регистрация с помощью СШК-2. В базе данных изменяется у бюллетеня статус на «УЧТЕН» и на мониторе происходит уведомление избирателя о регистрации бюллетеня, изменяются данные о ходе голосования. В случае, если после закрытия работы системы бюллетень не зарегистрирован СШК-2 – ему присваивается статус «УТЕРЯН»;
6. В случае обнаружения бюллетеня со штрих кодом, который не принадлежит избирательному участку происходит звуковое оповещение членов УИК, сотрудников МВД и наблюдателей о попытке совершения срыва голосования;
7. При закрытии избирательного участка система автоматически составляет отчет о количестве выданных бюллетеней для голосования по каждому виду выборов (в случае проведения нескольких выборов на избирательном участке), информацию о явке избирателей по каждому виду выборов, количество бюллетеней по каждому виду выборов оказавшихся в урне для голосования. В случае, если в урне оказывается количество бюллетеней больше, чем зарегистрировано СШК-2, то при ручной проверке возможно выявление бюллетеней, которые были не учтены или вброшены намеренно.

Моделирование модуля обнаружения и считывания штрих кодов

Моделирование системы машинного зрения на примере модуля обнаружения, считывания и распознавания штрих кодов проведено в среде графического пакета программирования LabVIEW.

LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) — это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments (США) [9].

Для проведения эксперимента использован модуль машинного зрения IMAQ Vision графического программирования пакета LabVIEW, приведенный на Рисунок 7:

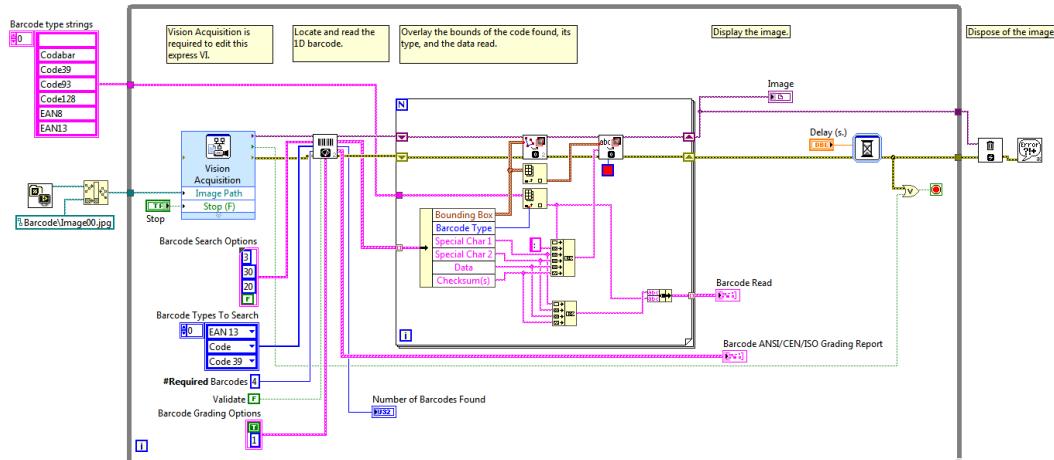


Рисунок 7 – Модуль обнаружения и считывания штрих кодов в модуле машинного зрения IMAQ Vision графического программирования пакета LabVIEW

На Рисунок 8 и Рисунок 9 приведены исследуемые объекты со штрих кодами, который удалось распознать системе и вывести буквенно-численную информацию в соответствующее поле «Data» на панели дисплея.

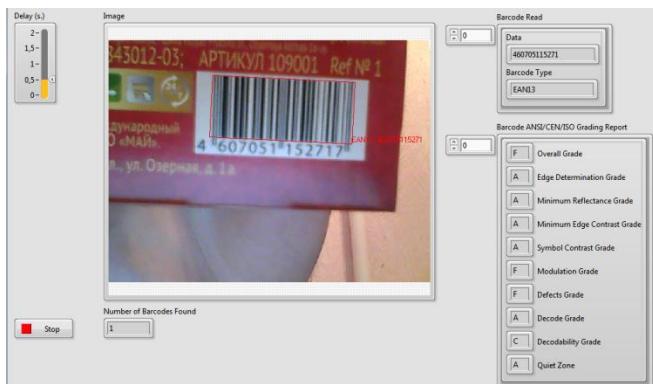


Рисунок 8 – Определение штрих кода на объекте №1

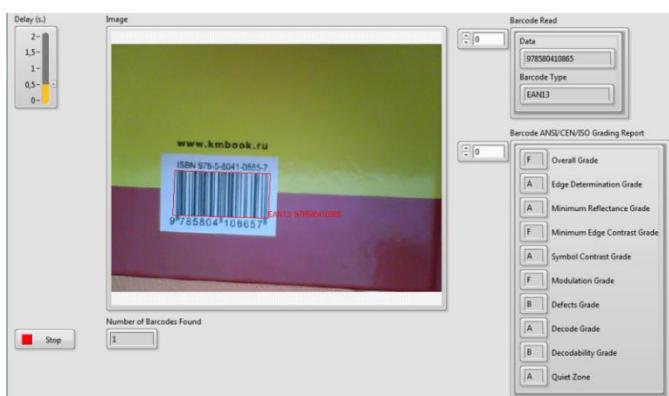


Рисунок 9 – Определение штрих кода на объекте №2

На исследуемых объектах система определила местонахождение штрих кодов и обозначила их в границу. В поле «Data» содержалась числовая информация, зашифрованная чередованием

черно-белых полос, которая дублируется под штрих кодом для ручного поиска в системах учета объектов (товары, документы и т.д.) по числовой информации при повреждении графического кодирования. Системой успешно распознан тип штрих кода EAN13 (Рисунок 8, Рисунок 9), используемый для кодирования идентификатора товаров и производителя, и тип штрих кода Code 39 на объекте №3 (Рисунок 10).

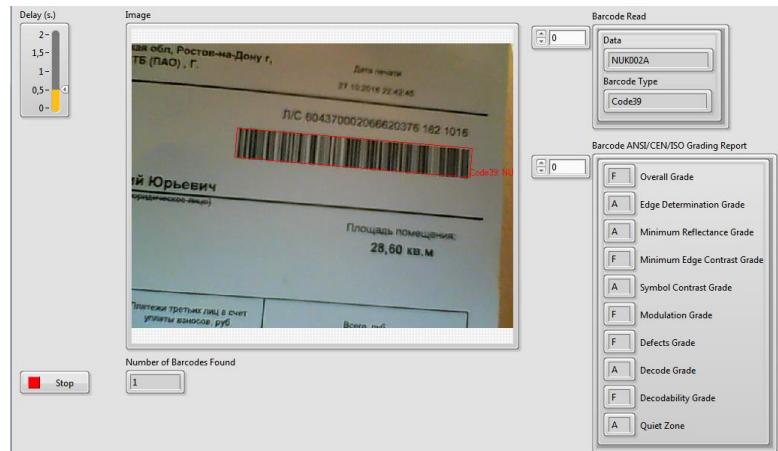


Рисунок 10 – объект №3 со штрих кодом типа Code 39

В штрих коде Code 39 шифруется больше информации, чем в EAN 13. Помимо численной информации также содержится и буквенная информация. Система на объекте №3 определила место нахождения штрих кода, его тип, но в связи с ограниченностью выводимых информационных полей дисплея корректно отобразить данные для оператора не удалось.

Данная система позволяет распознавать зашифрованную графическую информацию, представлять ее в буквенно-численном виде для оператора.

Заключение

Анализируя полученные результаты можно заключить, что для достижения поставленной цели был разработан модуль обнаружения и считывания штрих кодов в модуле IMAQ Vision графического программирования пакета LabVIEW.

Результаты распознавания штрих кодов, полученные в ходе моделирования разработанного модуля, зависят от разрешение обрабатываемого изображения – качества нанесения штрих кодов на поверхность маркированного объекта.

Модуль смог распознать области расположения штрих кодов, определить их тип и получить для оператора численную информацию с исследуемых изображений.

Часть изображения, которое было воспринято за штрих код, является чередованием параллельно расположенных линий на одной оси.

Разработанный модуль может быть использован при разработке системы учета бюллетеней на избирательные участки при проведении выборов и референдумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василик М.А., Вершинин М.С. Политология: Словарь-справочник. - М.: Гардарики, 2001. - 328 с.
2. ЦИК оценил стоимость думских выборов 2016 года // АО «Коммерсантъ» URL: <http://www.kommersant.ru/Doc/2832212>, (дата обращения: 08.08.2016).
3. Что такое выборная "карусель"? // URL: <http://www.cruer.com/archives/22146> (дата обращения: 15.09.2016).
4. Любарев, А. Е. Мертвые души. Методы фальсификации итогов голосования и борьба с ними / А. Е. Любарев, А. Ю. Бузин, А. В. Кынев. – М.: Никколо М, 2007. – 192 с.

5. Депутаты ввели уголовную ответственность за "карусели" на выборах // Интернет-портал «Российской газеты» URL: <https://rg.ru/2017/07/19/gosduma-odobrila-piat-let-tiurmy-za-karuseli-na-vyborah.html> (дата обращения: 19.07.2017).

6. Пескова О.Ю., Фатеева С.В. Электронное голосование: методы, риски и проблемы // Труды XVII Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество». - СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2014. - С. 247-258.

7. Доклад Председателя ЦИК России В.Е. Чурова «Техническое обеспечение выборов и электронного голосования в Российской Федерации» // ЦИК России URL: http://www.cikrf.ru/news/relevant/2012/07/19/doclad_churov_tech.html (дата обращения: 20.09.2016).

8. Подготовка к выборам в Государственную Думу Федерального Собрания Российской Федерации 2016 года // ЦИК России URL: http://cikrf.ru/analog/vib_d16/index.html (дата обращения: 20.08.2016).

9. National Instruments Russia. LabVIEW — автоматизация научных исследований URL: <http://www.labview.ru> (дата обращения: 02.09.2016)

О РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ГРУПП

Аннотация. Рассмотрен ряд задач, возникающих при моделировании взаимодействия социальных групп, представленных в соответствии с графовой парадигмой. Это задача представления больших графов, в том числе и с учетом фиксации графического расположения вершин. Описан пример работы алгоритма свертки графа, дающий дополнительные возможности при обработке больших данных. Рассмотрены возможности определения метрических характеристик графа, алгоритмы разделения графа на части и задачи пропорциональной дегенерации репрезентативного графа до размеров сопоставимых с реальным графом.

Ключевые слова: граф, моделирование, социальная группа, список, алгоритм; представление; локализация, свертка, разделение, дегенерация, метрические характеристики.

Annotation. Considered a range of tasks, arising in modeling of the interactions of social groups, submitted in accordance with the graph paradigm. This is the task to representation of large graphs, including fixation the placement of the graph nodes. As the example the algorithm of a convolution of the graph, which gives additional opportunities in processing big data was described. Considers the possibility of determining the metric characteristics of a graph, the algorithms split a graph into parts and tasks for proportional to degeneracy of the representative graph to the size of comparable to the real graph.

Keywords: graph, modeling, social group, list, algorithm, presentation, location, convolution, split, degeneracy, metric characteristics.

Введение

Интерес к моделированию и исследованию взаимоотношений в обществе между социальными, религиозными, профессиональными, этническими и другими группами возрос в конце прошлого века [1-3,11]. Причём исследователей интересует отношения внутри групп как в рамках государства, так и в межгосударственных отношениях. Заказчиками таких исследований выступают государственные и межгосударственные структуры, а также отдельные фирмы и организации. В основе моделей как правило лежат знания о психологии самой личности, межличностных отношений, а также социологии, теологии, этнографии и т.д. Конечно же исследования в этих областях являются определяющими для таких моделей, однако большое значение имеет выбор средств для создания моделей.

В создании инструментов и конкретных моделей важную роль играют университетские исследования. Это North Carolina State University [22-25], University of Michigan [21], University of Ottawa [26], Saint Louis University [27], Seikei University [28], Aalborg University, University of Georgia [29], University of Pennsylvania [30].

Однако предоставляемая в открытой печати информация не позволяет судить о возможностях варьировать детализацией и размером моделей, о наличии возможностей получать при необходимости данные о промежуточных результатах моделирования. Заложенные авторами в модель методы предоставляют такие и многие другие возможности, но это требует решения некоторых задач.

В качестве элеменарной единицы моделирования предлагается использовать как субъекта с частичным представлением функций, требуемых для реализации модели (оценивание ситуаций, событий, коммуникация, отдельные действия), так и результаты деятельности ассоциированные с отдельной личностью. И субъектный подход, и акторный подход могут быть представлены в графово-гиперграфовой парадигме.

Субъект-актор может быть представлен вершиной графа или ребром гиперграфа. В случае представления субъекта-актора ребром гиперграфа вершины, входящие в ребро могут быть, например, ассоциированы со свойствами личности.

Способы представления графа модели взаимодействия групп индивидуумов.

Рассмотрим связный неориентированный взвешенный граф модели $G = (G_v, G_E)$, где $G_v = \{gv_1, gv_2, \dots, gv_n\}$ – множество вершин графа (gv – graph vertex), $G_E = \{<ge_1, \mu_1>, <ge_2, \mu_2>, \dots, <ge_m, \mu_m>\}$ – множество ребер графа (ge – graph edge) с весовыми коэффициентами μ_i . Далее вес ребра из вершины gv_i в вершину gv_j будем обозначать μ_{ij} .

Как известно, граф можно представить в виде матриц смежности или инцидентности, или в виде списков. Для графов, представленных в виде матриц, имеет место избыточность необходимого ресурса памяти, что особенно имеет значение в случае использования графов больших размеров и существенной неполноты графа. В этой ситуации в качестве способа представления графов рекомендуется использование списков [8-10].

Списки встречаются двух видов [12]:

- списки смежности X_c (каждой вершине графа соответствует список смежных ей вершин);
- списки ребер X_p (имеет место список пар вершин графа, при этом каждой паре вершин соответствует определенное ребро).

Каждый список X_c или X_p содержит голову и хвост, для обозначения которых используются стандартные операторы [8,12] $hd(x)$ и $tl(x)$, обозначающие начало или заголовок списка x (head) и остаток или хвост списка x (teal).

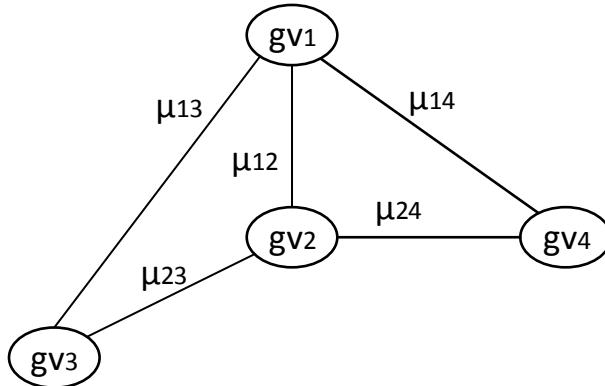


Рисунок 1 – Пример графа акторов G1

Рассмотрим неориентированный взвешенный граф $G1 = (G1_v, G1_E)$, представленный на рис.

1.

В нашем случае граф $G1$ задан множествами:

- вершин графа $G1_v = \{gv_1, gv_2, gv_3, gv_4\}$,
- ребер графа $G1_E = \{<ge_1, \mu_{12}>, <ge_2, \mu_{13}>, <ge_3, \mu_{14}>, <ge_4, \mu_{23}>, <ge_5, \mu_{24}>\}$.

При этом представление графа $G1$, в виде списков смежности X_c может выглядеть так:

$$X1_c = (gv_1: gv_2, \mu_{12}; gv_3, \mu_{13}; gv_4, \mu_{14}), (gv_2: gv_1, \mu_{12}; gv_3, \mu_{23}; gv_4, \mu_{24}), (gv_3: gv_1, \mu_{13}; gv_2, \mu_{23}), (gv_4: gv_1, \mu_{14}; gv_2, \mu_{24}).$$

Рассмотрим форму записи списка на примере. Граф акторов $G1$ содержит 4 вершины, поэтому X_c состоит из 4 частей, что условно можно отобразить следующим образом: $X1_c = (X1_{c1}, (X1_{c2}), (X1_{c3}), (X1_{c4}))$. При этом запись $X1_{c1} = (gv_1: gv_2, \mu_{12}; gv_3, \mu_{13}; gv_4, \mu_{14})$ означает, что вершина gv_1 связана с вершинами gv_2, gv_3, gv_4 ребрами с весовыми коэффициентами $\mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{14}$ соответственно. Данный список содержит голову списка $hd(x_{c1}) = (gv_1)$ и хвост списка $tl(x_{c1}) = (gv_2, \mu_{12}; gv_3, \mu_{13}; gv_4, \mu_{14})$. Для формализации записи предлагается использовать следующие правила: голова списка отделяется от хвоста символом «:»; вершины хвоста отделяются друг от друга символом «;»; если хвост содержит не только номера вершин, но и их весовые коэффициенты, то они отделяются друг от друга символом «,».

Списки ребер $X1_p$ для графа ситуаций $G1$ будут иметь вид:

$$X1_p = (gv_1: gv_2, \mu_{12}), (gv_1: gv_3, \mu_{13}), (gv_1: gv_4, \mu_{14}), (gv_2: gv_1, \mu_{12}), (gv_2: gv_3, \mu_{23}), (gv_2: gv_4, \mu_{24}), (gv_3: gv_1, \mu_{13}), (gv_3: gv_2, \mu_{23}), (gv_4: gv_1, \mu_{14}), (gv_4: gv_2, \mu_{24}).$$

В рассматриваемом примере граф содержит 5 ребер, поэтому список ребер Xl_p состоит из 10 частей, т.к. $G1$ – неориентированный граф. Например, запись $(gv4: gv2, \mu_{24})$ означает ребро с весом μ_{24} , которое соединяет вершины $gv4$ и $gv2$.

Если использовать функции разделения и составления списка, описанные в [8], то очевидно, что в нашем примере запись списка смежности $Xl_{cl} = (gv1: gv2, \mu_{12}; gv3, \mu_{13}; gv4, \mu_{14})$ можно представить в виде списков ребер за несколько итераций. В общем случае список x может быть представлен в виде: $hd(x), hd(tl(x)), hd(tl(tl(x))), hd(tl(tl(tl(x))))$, ...

Подробно пример разделения списка рассмотрен в [12], что позволяет сделать вывод о целесообразности представления графов в виде списков ребер.

Локализация вершин графа. Конкретный граф имеет множественное графическое представление. Можно считать, что вид графического представления является дополнительной возможностью представления отношений между вершинами в виде взаимного расположения.

Зачастую удачное графическое представление даёт аналитику дополнительные возможности в понимании моделируемых процессов.

На рис. 2 показаны различные варианты изображения графа ситуаций $G1$. Очевидно, что для всех трех изображений графа $G1$ стандартные формы представления (матрицы и списки) будут совпадать, в то время как визуальные изображения отличаются. Для решения этой проблемы необходим поиск такого способа представления графа, в котором указываются не только логические связи между вершинами графа, но и их взаимное расположение, отмечаются точки пересечений ребер графа и т.д.

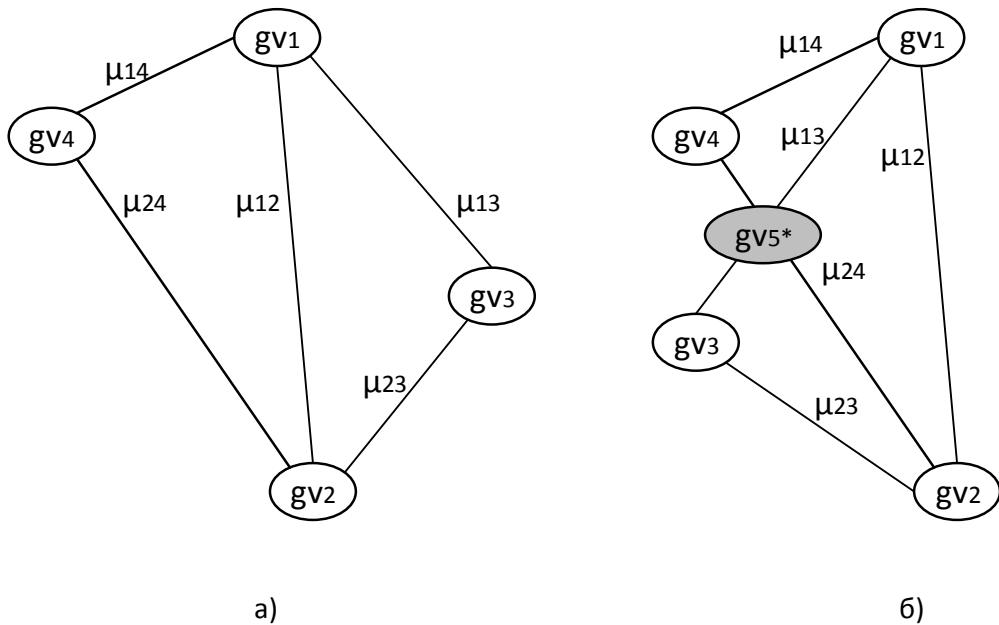


Рисунок 2 – Возможные визуальные представления графа ситуаций $G1$

Авторами предлагается следующий комплекс мероприятий:

1)формирование определенных правил при составлении списков с привязкой к номерам вершин и их локальным расположениям (примеры рассмотрены в литературе [4-7]);

2)введение понятия области локализации вершины, под которой следует понимать область допустимого перемещения вершины, с целью фиксации расположения вершины графа;

3)для локализации возможных пересечений ребер предлагается точки пересечения помечать вершинами с особым статусом, например, как вновь сформированными (вершина $gv5^*$ на рис.2б).

Поглощение и обобщение на графовых моделях. Как уже отмечалось ранее, работа с графиками больших размеров сложна и трудоемка. В связи с этим целесообразно применение алгоритмов для возможного анализа графа с последующим его сворачиванием. Кроме того, возможна ситуация когда на определенном этапе один или несколько подграфов не нужны для

дальнейшей обработки и достаточно представить их в виде списков и свернуть до уровня одной вершины.

Алгоритм свертки или поглощения графа, предлагаемый авторами, можно в общем сформулировать следующим образом:

- 1) определенным образом выбирается исходная вершина графа для свертки;
- 2) выполняется поиск вершин смежных исходной вершине, при этом фиксируются найденные вершины и ребра инцидентные исходной вершине;
- 3) выполняется поиск и фиксация ребер инцидентных найденным смежным (соседним) вершинам, но не инцидентным исходной вершине;
- 4) исходная и смежные ей вершины представляются в виде списка;
- 5) выполняется операция элементарного стягивания² зафиксированных ребер и формируется новая вершина;
- 6) полученной вершине назначается статус исходной;
- 7) последовательность действий (2-6) повторяется до тех пор пока все вершины графа не будут поглощены в одну.

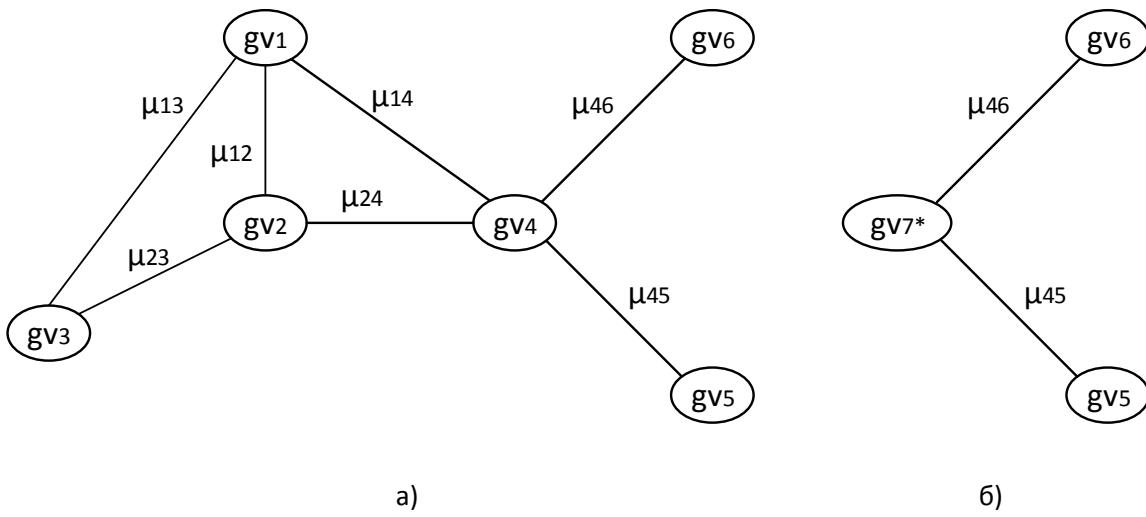


Рисунок 3 – Пример графа G2 (а – первоначальный график, б – график после 1-го цикла свертки)

Рассмотрим процедуру поглощения подробнее на примере графа G2 (рис. 3а):

- 1) в качестве исходной вершины выберем gv_2 ($gv_{исх} = gv_2$);
- 2) для исходной вершины $gv_{исх}$ определяем:
 - смежные вершины – gv_1 , gv_3 и gv_4 ($gv_{смi} = \{gv_1, gv_3 \text{ и } gv_4\}$);
 - инцидентные ребра с весовыми коэффициентами μ_{12} , μ_{23} , μ_{24} ;
- 3) фиксируем ребра, соединяющие $gv_1 - gv_3$ и $gv_1 - gv_4$ с весовыми коэффициентами μ_{13} и μ_{14} соответственно;
- 4) составляем 1-й список ребер $X2_p$ для части графа ситуаций G2:

$$X2_{p1} = (gv_2: gv_1, \mu_{12}), (gv_1: gv_2, \mu_{12}), (gv_2: gv_3, \mu_{23}), (gv_3: gv_2, \mu_{23}), (gv_2: gv_4, \mu_{24}), (gv_4: gv_2, \mu_{24}), (gv_1: gv_3, \mu_{13}), (gv_1: gv_4, \mu_{14}), (gv_3: gv_1, \mu_{13}), (gv_4: gv_1, \mu_{14}).$$
- 5) выполняет стягивание зафиксированных ребер и формируем новую вершину gv_7^* (рис. 3б);
- 6) исходная вершина $gv_{исх} = gv_7^*$;
- 7) для исходной вершины $gv_{исх}$ определяем:
 - смежные вершины – gv_5 и gv_6 ($gv_{смi} = \{gv_5, gv_6\}$);
 - инцидентные ребра с весовыми коэффициентами μ_{45} , μ_{46} ;
- 8) ребра, соединяющие $gv_5 - gv_6$ отсутствуют;
- 9) составляем 2-й список ребер $X2_{p2}$ для части графа ситуаций G2:

² Элементарное стягивание – это процедура стягивания ребра вместе с инцидентными ему вершинами в одну вершину.

$$X2_{p2} = (gv_7^*: gv_5, \mu_{45}), (gv_5: gv_7^*, \mu_{45}), (gv_7^*: gv_6, \mu_{46}), (gv_6: gv_7^*, \mu_{46}).$$

10) выполняем стягивание зафиксированных ребер и формируем новую вершину gv_8^* (рис. 3б);

- 11) исходная вершина $gv_{\text{исх}} = gv_8^*$;
- 12) для исходной вершины $gv_{\text{исх}}$ не определены:
 - смежные вершины;
 - инцидентные ребра;
- 13) работа алгоритма завершена.

Вычисление метрических характеристик графов модели. При проектировании графа модели зачастую возникает необходимость определения его характеристик. К метрическим или числовым характеристикам можно отнести параметры графа, которые определяются через кратчайшие расстояния между вершинами: радиус, центр и диаметр [13].

Диаметр d определяется как максимальное расстояние из всех кратчайших расстояний между парами вершин графа. Центр представляет собой вершину O , максимальное расстояние от которой до всех остальных вершин графа является минимальным. Радиус графа r – это максимальное расстояние от центра.

Вычислим метрические характеристики для рассмотренных ранее неориентированных графов $G1$ (рис. 1) и $G2$ (рис. 3а) с взвешенными коэффициентами. Если предположить, что длина ребра 1 соответствует весовому коэффициенту μ этого ребера, то $l = \mu$. В нашем случае для простоты будем полагать, что все весовые коэффициенты μ принимают значения «1» и расстояние l между каждой парой смежных вершин равно единице ($l = 1$).

Как видно, для графа $G1$ (рис. 1) диаметр d ($G1$) равен «1», т.к. все найденные минимальные расстояния от каждой вершины к любой другой имеют значения единицы. Центр графа O ($G1$) отсутствует, радиус графа r ($G1$) не определяется. При этом, очевидно, все вершины gv_1, gv_2, gv_3, gv_4 графа $G1$ являются периферийными. К периферийным вершинам относятся такие вершины, эксцентриситет которых равен диаметру графа.

При определении метрических характеристик графа $G2$ (рис. 3а) возникает необходимость поиска всех кратчайших расстояний l_{ij} между вершинами gv_i и gv_j . Такие значения сведены в табл. 1 при условии $l = 1$.

Таблица 1 – Значения кратчайших расстояний между вершинами графа $G2$

	1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	1	2	2
2	1	0	1	1	2	2
3	1	1	0	2	3	3
4	1	1	2	0	1	1
5	2	2	3	1	0	2
6	2	2	3	1	2	0

Если проанализировать табл. 1 становится очевидным, что $d (G2) = 3$, при этом периферийными вершинами графа $G2$ являются вершины: gv_3, gv_5 и gv_6 . Центром графа $G2$ является вершина gv_4 ($O_{G2} = gv_4$). Радиус $r_{G2} = 2$.

Очевидно, что рассмотренные параметры характеризуют граф и предоставляют информацию о моделируемых процессах структур. Существуют стандартные методы определения таких характеристик путем нахождения кратчайших расстояний между всеми парами вершин. В случае перебора всех расстояний несложно определить набор периферийных вершин графа как вершин, расположенных на концах диаметров, в случае если диаметр представлен не одним значением, а несколькими, лежащими в допустимом диапазоне.

Однако, для больших структур полный перебор пар вершин является весьма трудоемким процессом. В таких случаях предлагаются алгоритмы быстрого поиска [14], основанные на методах случайной выборки.

Задача разбиения графа. При моделировании взаимодействия групп индивидумов может возникнуть необходимость отображение распределения зон влияния.

Если мы хотим распространить информацию по всем акторам сети при ограничениях на время или на длину цепочек распространения, у нас возникает задача разбиения графа на части с последующим вычислением центров этих частей.

Для решения данной задачи разработано множество методов и алгоритмов, среди которых можно выделить основные группы: геометрические, спектральные и комбинаторные.

Геометрические методы основаны на использовании координат узлов сети без учета их связности. Среди них известны методы:

- рекурсивного покоординатного разбиения;
- рекурсивный инерционный метод разбиения;
- разбиения с помощью кривых заполняющих пространство (например, кривых Пеано).

Для решения наших задач геометрические методы не представляют интереса, т.к. они используются для разделения сети, а не графа, который ее представляет.

Спектральные методы сводят задачу дискретной оптимизации в задачу непрерывной оптимизации. Суть спектральных методов заключается в получении дискретного оператора Лапласа графа, при помощи которого вычисляются меры расстояния, потом они сортируются, и полученный список делится на части, обеспечивая тем самым разбиение.

Если геометрические методы позволяют группировать вершины в зависимости от их пространственной близости, то комбинаторные методы, наоборот нацелены на объединение вершины в группы с учетом их связности, без привязки к пространству. Среди комбинаторных методов известны:

- метод деления с учетом связности (*Levelized Nested Dissection, LND*);
- алгоритм Кернигана-Лина (*KL*) и его модификации.

В [15] рассматривается задача разделения графа на подграфы с минимизацией средних перемещений по подграфам и предлагается многоуровневый алгоритм разделений.

Проанализировав литературные источники можно отметить предложенные алгоритмы для решения задачи оптимального разделения графа [16,17]. Такая задача состоит в разбиении вершин графа на непересекающиеся подграфы с максимально близкими суммарными весами вершин и минимальным суммарным весом ребер, проходящих между полученными подграфами.

Однако следует отметить, что может иметь место задача разбиения графа на частично пересекающиеся подмножества вершин. Частичность пересечения в данном случае может быть обусловлена необходимостью для подграфа иметь вершину-«своего агента» в соседнем подграфе. В этом случае предлагается для каждого подграфа определить свой список периферийных вершин и одну или несколько таких вершин из подмножества 1 добавить в соседнее подмножество 2. При этом может возникнуть ситуация, когда нарушится баланс по количеству вершин в подграфах. Если такое нарушение критично, предлагается обмениваться между подграфами одинаковым количеством периферийных вершин.

Рассмотрим пример. На рис. 4 представлен граф G2, разбитый на подграфы А и В. Каждый подграф содержит по три вершины:

- А = {gv1, gv2, gv3};
- В = {gv4, gv5, gv6}.

Оба подмножества А и В не пересекаются. Каждая из вершин, входящих в оба подмножества является периферийной. Очевидно, что «вершины-агенты» должны быть смежными хотя бы одной из своих вершин. В данном случае имеют место две пары смежных вершин gv1 – gv4, и gv4 – gv2. Мы выбрали пару gv4 – gv2 ввиду их близкого расположения в графе. При этом каждый из подграфов увеличивается, как показано на рис. 5, и содержит по 4 вершины:

- А = {gv1, gv2, gv3, gv4};

- $B = \{ gv_2, gv_4, gv_5, gv_6 \}$.

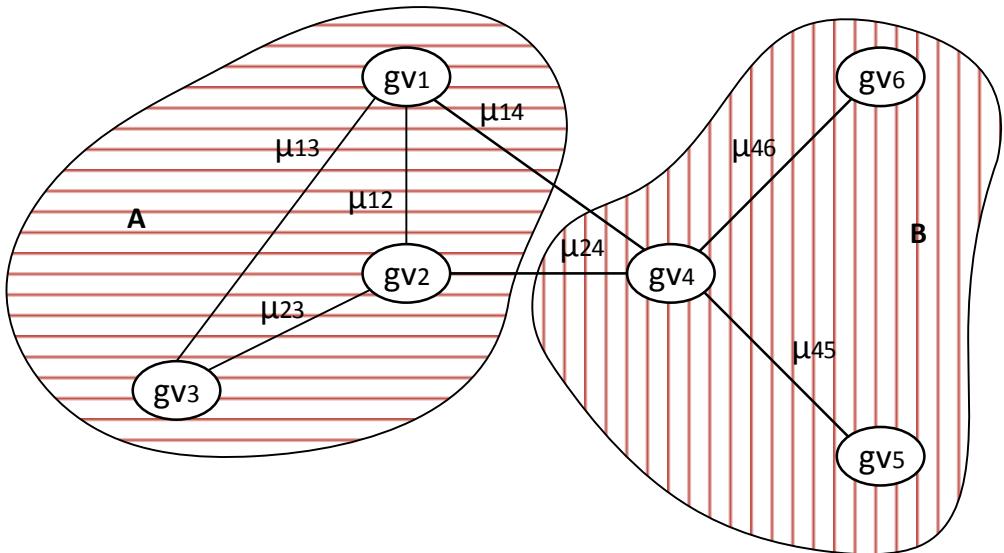


Рисунок 4 – Пример разбиения графа ситуаций G2 на подграфы

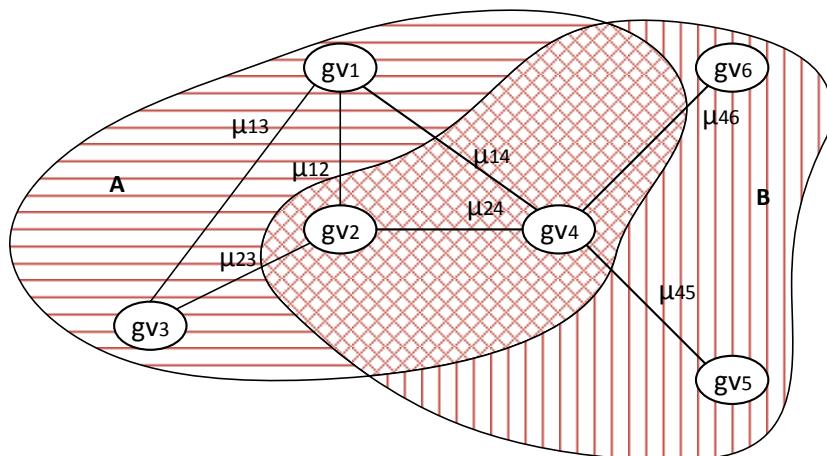


Рисунок 5 – Пример пересечения подмножеств вершин графа G2

Кроме того, рассмотренные методы и алгоритмы предполагают возможность разбиения графа на равные части, в то время как не решена задача разделения графа на пропорциональные подмножества вершин. Это может потребоваться при решении задачи разбиения больших графов, например, в случае движения по графу в различных направлениях с разной скоростью.

Задача пропорциональной дегенерации графа ситуаций. Возможна ситуация, когда имеется граф, построенный по репрезентативной выборке. Такой граф должен обладать всеми свойствами самого графа. Для решения задач на полном графе необходимо дегенерировать репрезентативный граф до размеров сопоставимых с реальным графиком с сохранением свойств репрезентативности.

Кроме того, граф модели может быть задан стационарно или изменяться во времени. Он может быть конечным или условно бесконечным. Под условно бесконечным графиком будем понимать график, размеры которого невозможно определить в фиксированный момент времени. Таким образом может возникнуть ситуация, когда необходимо спрогнозировать дальнейшее развитие существующего графа в сторону увеличения или уменьшения.

Граф может быть достроен с использованием методов эвристического прогнозирования, в частности, метода Дельфи [18]. Сделать это можно так же с использованием нескольких простых методов прогнозирования, применяемых в определенной последовательности, например, метод прогнозного графа и «дерева целей» [19,20]. Метод прогнозного графа и «Дерева целей»

представляют собой методы прогнозирования сложных систем или процессов, для которых имеется возможность выделить структурные или иерархические уровни. В основу метода прогнозного графа положено первоначальное осуществление подцелей и событий, лежащих на низких уровнях иерархии. «Дерево целей» представляет собой ориентированный граф, который строится на основе последовательного выделения все менее значительных уровней и событий.

В нашем же случае рассматривается неориентированный граф, к тому же в графе могут быть не выражены в явном виде иерархические уровни. Так же полезно понимание значимости периферийных вершин. Кажется логичным использование таких вершин для дегенерации графа. Это обусловлено легкостью добавления связей к вершинам с возможно меньшим количеством инцидентных ребер в силу свойства периферийности.

К тому же может быть поставлена задача пропорциональной дегенерации графа с заданными числовыми показателями в виде процентного соотношения (q). В этом случае возможно выполнение последовательности действий:

1) поиск периферийных вершин-ситуаций графа pgv любым из известных методов, в том числе рассмотренных ранее;

2) определение количества периферийных вершин p ;

3) определение количества вершин дегенерации как $[n \cdot (q/100)]$, где n – количество вершин исходного графа;

4) нахождение соотношения количества периферийных вершин и вершин дегенерации как $S = [p - n \cdot (q/100)]$;

5) выполнение действия в зависимости от значения S :

если $S < 0$, то к каждой периферийной вершине добавляем по одной вершине дегенерации, затем продолжаем добавлять $(-S)$ вершин к тем же периферийным вершинам по очереди;

если $S > 0$, то к каждой периферийной вершине добавляем по одной вершине дегенерации до тех пор, пока не закончатся вершины дегенерации;

если $S = 0$, то к каждой периферийной вершине добавляем по одной вершине дегенерации.

Предложенный алгоритм позволяет доопределить граф до необходимого с сохранением свойства репрезентативности.

Заключение.

Предложенные методы решения задач позволяют по частичным репрезентативным свойствам модели строить весь граф модели (дегенерация графа) с учётом определенных репрезентативных свойств. Разбиение полученного графа на непересекающиеся или пересекающиеся части позволит в частности идентифицировать зоны влияния в модели. А свертка и разворачивание графа наряду с удачным выбором представления значительно повышают удобство работы с графиком модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гюльмамедов Р.В. Метод построения стратегии в системах ситуационного управления // Научный журнал «Информационно-управляющие системы». – Спб: ГУАП, 2011. – №6. – С. 36-39.
2. Белянский Г.И., Кондратьева Т.Н., Мисюра В.В. Нейросетевое имитационное моделирование скачкообразных процессов на примере устойчивых и умеренно-устойчивых процессов // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2015. – №3(187). – С.15-18.
3. Шестаков А.В., Мунтян Е.Р., Потапов В.В., Терлецкий В.В. Моделирование нейросетевых взаимодействий с использованием механизма клеточных автоматов // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №10(124). – С. 601-610. – (<http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/36.pdf>).
4. Курапов С.В., Чечения В.С. Топологические методы построения рисунка графа // Научный журнал Радиоэлектроника, информатика, управление. – Запорожский национальный технический университет, 2013. – №1(28). – С. 72-81.

5. Курапов С.В., Давидовский М.В. Проверка планарности и построения топологического рисунка плоского графа (поиском в глубину) // Прикладная дискретная математика, – Томск, 2016. – №2(32). – С. 100-114.
6. Бабурин Д.Е. Иерархический подход для автоматического размещения ациклических графов // Современные проблемы конструирования программ. – Новосибирск: Ин-т систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН, 2002. – 256 с.
7. Апанович З.В. Методы навигации при визуализации графов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2008. – т. 6, вып. 3. – С. 35-47.
8. Фостер Дж. Обработка списков. – М.: Мир, 1974. – 72 с.
9. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2000. – 960 с.
10. Муха Ю.П., Секачев В.А. Алгоритм для определения возможности наложения направленных графов // Известия ВолГУ, 2014. – 10 (137), том 9, С. 87-97.
11. Сергеев Н.Е., Целых А.А. Нечеткие теоретико-графовые подходы к моделированию и анализу социосемантических сетей знаний для задач принятия решений в научной и научно-технической экспертизе // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №09(123). – С. 1-21. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/09/pdf/27.pdf>.
12. Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р., Целых А.А., Самойлов А.Н. Обобщение графов ситуаций на основе спискового алгоритма свертки для задач ситуационного управления // Известия ЮФУ. Технические науки, 2017. – №3. – С. 111-121.
13. Раппопорт А.М. Метрические характеристики графов сетей коммуникаций // Труды ИСА РАН, 2005. – Т.14. – С. 141-147.
14. Ураков А.Р., Тимеряев Т.В. Алгоритмы быстрого поиска для двух задач о метрических характеристиках взвешенных графов // Управление большими системами: сборник трудов, 2013. – №42. – С. 153-172.
15. Ураков А.Р., Тимеряев Т.В. Многоуровневый алгоритм разбиения графов по критерию средней длины // Информационные технологии. – Изд-во Новые технологии.: М., 2012. – №4. – С. 22-25.
16. Шматков С.И., Толстолужская Е.Г., Артюх Ю.А. Анализ распараллеливания алгоритма задачи оптимального разделения графа на подграфы // Сборник научных трудов Харьковского университета Воздушных Сил, Харьков, 2013. – выпуск 2(35). – С. 132-134.
17. Пастухов Р.К., Коршунов А.В., Турдаков Д.Ю., Кузнецов С.Д. Улучшение качества разбиения графа с помощью многоуровневой оптимизации // Труды ИСП РАН, 2014. – том 26, вып. 4 – С. 21-31.
18. Кукушкина С.Н. Метод Дельфи в форсайт-проектах // Форсайт, 2007. – №1 (1). – С. 68-72.
19. Громова Н.М., Громова Н.И. Основы экономического прогнозирования. Учебное пособие. – В.Новгород, 2007. – 80 с.
20. Мисюра В.В., Кондратьева Т.Н., Бенгус Б.В. Сравнительный анализ методов прогнозирования тенденции развития временных рядов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2014. – №2(54). – С.124-128.
21. Chen R., Chen Y. The Potential of Social Identity for Equilibrium Selection // American Economic Review, 2011. – Vol. 101. – №6. – P. 2562-89.
22. Mark O. Riedl and Robert St. Amant. Social Navigation: Modeling, Simulation, and Experimentation // AAMAS '03 Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. – Melbourne, Australia, 2003. – P. 361-368.
23. Yongqin Gao, Greg Madey, Vince Freeh. Modeling and Simulation of the Open Source Software Community // Agent-Directed Simulation Conference, San Diego, CA, April 2005. – P. 113-122.
24. Jonathan P. Rowe and James C. Lester. Modeling User Knowledge with Dynamic Bayesian Networks in Interactive Narrative Environments // AIIDE'10 Proceedings of the Sixth AAAI Conference

on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment. – Stanford, California, USA. – October, 2010. – P. 57-62.

25. Lester J. C. et al. Modeling Metacognitive Monitoring in Narrative-Centered Learning Environments // International Conference on Artificial Intelligence in Education, 2011. – №6. – P. 163-170.

26. Ti Ören. Rationale for A Code of Professional Ethics for Simulationists // Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, 2002. – T.I. – P.1-6.

27. Vander Wal JS, Gibbons JL, Grazioso Mdel P. The sociocultural model of eating disorder development: application to a Guatemalan sample // Eat Behav, 2008. – Aug; 9(3). – P. 277-84.

28. A.A. Lipi1, Y. Nakano1, and M. Rehm. A Socio-Cultural Model Based on Empirical Data of Cultural and Social Relationships // Culture and Computing, LNCS 6259, 2010. – P. 71-84.

29. Daniel T. Hickey, Steven J. Zuiker. Engaged Participation: A Sociocultural Model of Motivation With Implications for Educational Assessment // Educational Assessment, 2005. – №3. – P. 277-305.

30. Barry G. Silverman, Michael Johns, Jason Cornwell, and Kevin O'Brien. Human Behavior Models for Agents in Simulators and Games: Part I: Enabling Science with PMFserv // Teleoperators and Virtual Environments, 2006. – Vol.15, I.2. – P. 139-162.

IV. УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Абрамкин Сергей Евгеньевич, Душин Сергей Евгеньевич, Сердитов Юрий Николаевич

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОННАХ НАСАДОЧНОГО ТИПА

Аннотация. Цель – разработка программного модуля для моделирования теплообменных процессов в ректификационных колоннах насадочного типа применительно к газовой промышленности. Решаемые задачи: получение разностных схем моделирования нелинейных теплообменных процессов в подсистеме «Ректификация»; сравнительный анализ численных методов. Результаты: программный модуль на языке программирования C++ для визуализации и исследования нелинейных теплообменных процессов.

Ключевые слова: ректификационная колонна, теплообмен, распределенный объект, нелинейная модель, разностная схема.

Annotation. The goal is to develop a software module for simulation of heat transfer processes in distillation columns packed type for gas to industry. Objectives: obtaining difference schemes simulation of nonlinear heat transfer processes in the subsystem "Rectification"; the comparative analysis of numerical methods. Results: a software module in the programming language C++ for visualisation and analysis of nonlinear heat transfer processes.

Keywords: distillation column, heat exchange, distributed object, a nonlinear model differencing scheme.

Введение

Важное место в экономике России занимает газовая промышленность. В связи с этим большое внимание уделяется технологиям добычи, подготовки и транспортировки природного газа. Для предотвращения износа магистральных трубопроводов осуществляется подготовка природного газа к транспортировке. Наиболее распространенным способом подготовки природного газа к транспортировке является абсорбционная осушка, которая состоит из двух технологических процессов: абсорбционной осушки и регенерации абсорбента.

Процесс регенерации абсорбента в системе подготовки природного газа, является ключевым. Это обусловлено тем, что абсорбент на газовых промыслах используется многократно. Соответственно основной задачей данного процесса является восстановление характеристик абсорбента до начальных условий.

Физически регенерация абсорбента характеризуется двумя взаимосвязанными процессами: массообменным и теплообменным. Эти процессы протекают в аппарате колонного типа. При этом доминирующим считается процесс теплообмена, который оказывает сильное влияние на массообменный процесс [1].

Ректификационная колонна (РК), состоит из четырех массообменных секций, заполненных пакетами регулярной насадки и распределительными тарелками. В настоящее время для описания процесса регенерации абсорбента в основном применяются статические модели [2]. Для исследования нестационарных режимов работы РК предложена динамическая математическая модель (ММ) процессов, представленная в виде системы дифференциальных уравнений с частными производными (ДУЧП) [1]. Предложенная ММ адекватно описывает реальные тепломассообменные процессы, происходящие в системе «Ректификация», и явилась основой для построения разностных схем и сравнения результатов численного моделирования.

Аналитическое решение нелинейных уравнений математической физики достигается лишь для ограниченного круга задач [3]. В большинстве случаев их решение возможно только с использованием численных методов. Таким образом, актуальной является задача разработки численного алгоритма, адаптированного для численного решения данного класса нелинейных моделей.

Разностная схема процесса теплообмена. Разработка разностной схемы основана на динамической ММ, отражающей противоточное движение фаз, участвующих в теплообменном процессе в виде системы ДУЧП первого порядка [1]:

$$\frac{\partial \theta_{\text{п}}}{\partial t} = -v_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) \frac{\partial \theta_{\text{п}}}{\partial z} - R_{\theta_{\text{п}}}(\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ж}}),$$

$$\frac{\partial \theta_{\text{ж}}}{\partial t} = v_{\text{ж}} \frac{\partial \theta_{\text{ж}}}{\partial z} + R_{\theta_{\text{ж}}}(\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ж}}),$$

где $v_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) = \left(\frac{V_m \bar{G}_{\text{п}} (\theta_0 + \theta_{\text{п}}) P_0}{(\pi \theta_0 P_p D^2)/4} \right)$ – скорость потока газа, м/с; $v_{\text{ж}}$ – скорость потока жидкости (абсорбента), м/с; $\theta_{\text{п}}$ – температура пара, °С; $\theta_{\text{ж}}$ – температура жидкости, °С; θ_0 – нормальная температура 273 К; D – диаметр основания колонны, м; V_m – объем моля идеального газа при нормальных условиях; P_0 – нормальное давление, Па; P_p – рабочее давление, Па; Гп – расход пара, кмоль/с; t – время, с; z – пространственная переменная; $R_{\theta_{\text{п}}}$, $R_{\theta_{\text{ж}}}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физико-химического состояния фаз и геометрии аппарата.

Особенностью рассматриваемой системы является нелинейная зависимость скорости теплового потока пара от его температуры.

Исходная ММ теплообменного процесса в РК описана в форме ДУЧП, но для применения методов численного моделирования необходимо дискретизировать уравнения по времени и пространству [3]. Воспользоваться этими методами, можно только проведя линеаризацию исходной ММ.

Для построения разностной схемы введены сетки в области изменения независимых переменных и задан шаблон. Сетка задается по пространственной переменной z с шагом h и по временной переменной t с шагом τ . На сетках определяются аппроксимирующие сеточные функции $X(z, t)$ и $Y(z, t)$.

В каждой узловой точке (z_n, t_n) задан шаблон (рис. 1).

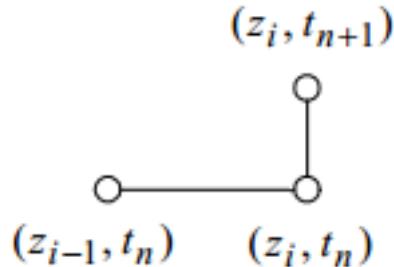


Рисунок 1 – Трехточечный шаблон

Шаг интегрирования ограничивается по времени выражением
 $\tau \leq 0.5h^2 / a$.

Решение производится по слоям, начиная с первого (нулевой слой определяется начальным распределением температуры).

В случае постоянной скорости потока газа уравнения, определяющие значения искомой функции в узлах i -го слоя, представляют собой линейную алгебраическую систему:

$$X_{n+1}^i = -X_n^i(\gamma_1 - 1 + R_{\theta_{\text{п}}} \tau) + \gamma_1 X_n^{i-1} + R_{\theta_{\text{п}}} \tau Y_n^j$$

$$Y_{n+1}^i = -Y_n^i(\gamma_2 - 1 + R_{\theta_{\text{ж}}} \tau) + \gamma_2 Y_n^{i-1} + R_{\theta_{\text{ж}}} \tau X_n^j,$$

где $\gamma_1 = \frac{a\tau}{h}$, $\gamma_2 = \frac{b\tau}{h}$, X_n^i – температура пара, Y_n^j – температура жидкости.

Результаты моделирования процессов представлены в графическом виде на рис. 2.

Динамическая модель, представленная ДУЧП, характеризующими изменения температуры тепловых потоков, может быть осложнена функциональным видом скорости пара. Если временной шаг достаточно мал, то изменения значений в узлах сетки незначительны. При этом нелинейные члены изменяются медленно, чтобы представлять особую трудность. Нелинейные составляющие вычисляются через известные значения, определяемые в предыдущий момент времени t_{n-1} и ошибки при этом невелики.

Однако когда шаг по времени сравнительно велик, явная итерационная схема не обязательно сходится, либо ее сходимость может быть медленной. При еще больших временных шагах численное решение может существенно изменяться в пределах одного временного шага. В таких случаях целесообразно переходить на неявные алгоритмы.

В ходе работы были исследованы различные шаблоны (т.е. разнообразные вариации нахождения последующих слоев схемы). Но более достоверные результаты показала графическая схема, представленная на рис. 3.

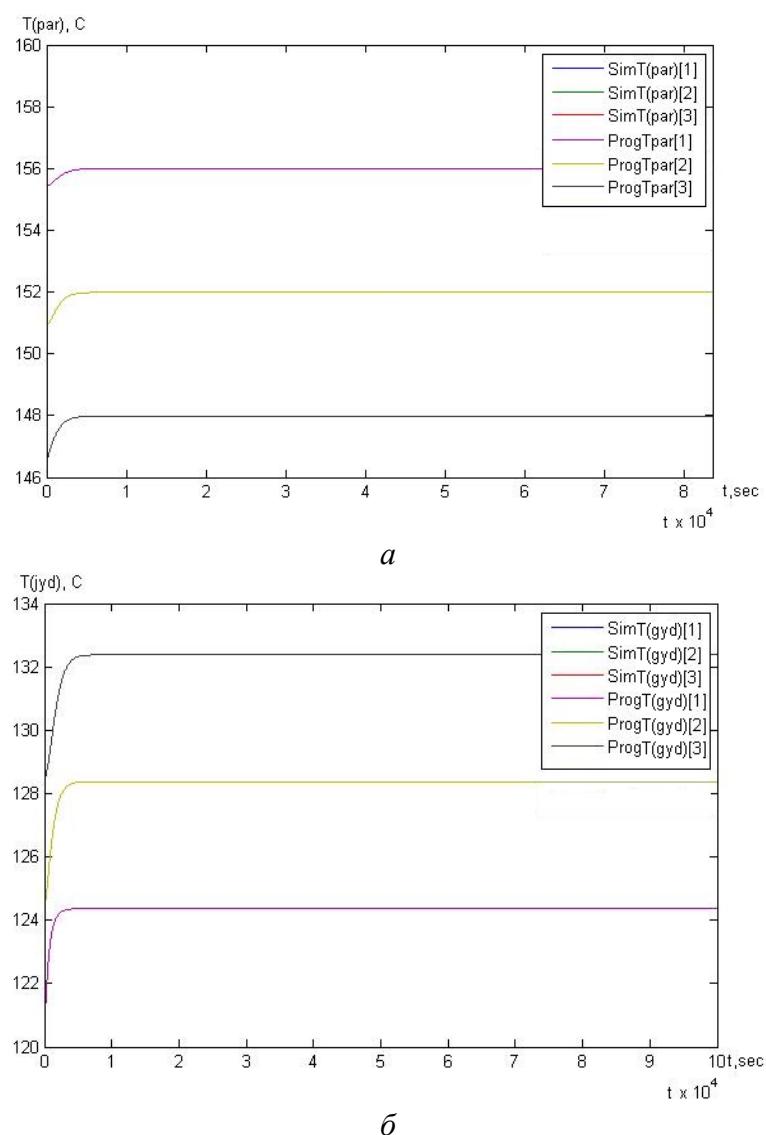


Рисунок 2 – Графики переходных процессов линейной системы в различных узлах сеток:
α – для пара, β – для жидкости

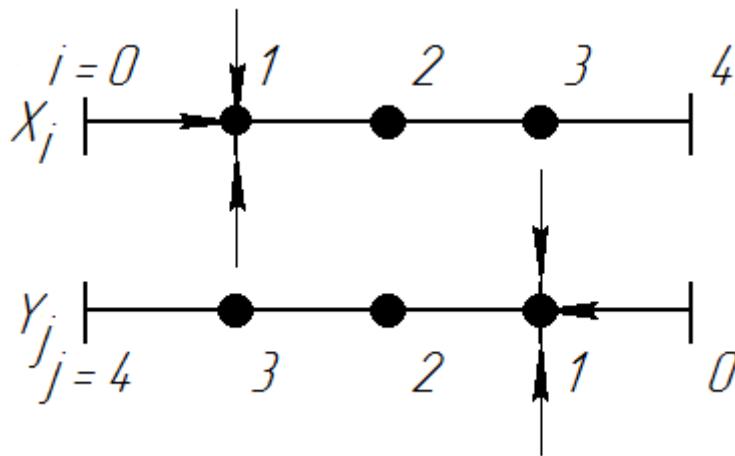


Рисунок 3 – Графическая схема формирования нелинейной разностной схемы

Другие шаблоны показали либо расходящиеся процессы, либо их установившиеся значения резко отличались от реальных, что исключает их применение для описания физики протекающих процессов.

Нелинейная разностная модель записывается в следующей форме

$$X_{n+1}^i = -X_n^i(\gamma\tau - 1 - \gamma(X_n^i)\tau + R\tau) + \gamma\tau X_n^{i-1} - \gamma(X_n^i)\tau X_n^{i+1} + R\tau Y_n^j,$$

$$Y_{n+1}^i = -Y_n^i(\gamma 2 - 1 + R_{\theta_g}\tau) + \gamma 2 Y_n^{i-1} + R_{\theta_g}\tau X_n^j.$$

Результаты моделирования процессов с помощью нелинейной разностной схемы приведены на рис. 4.

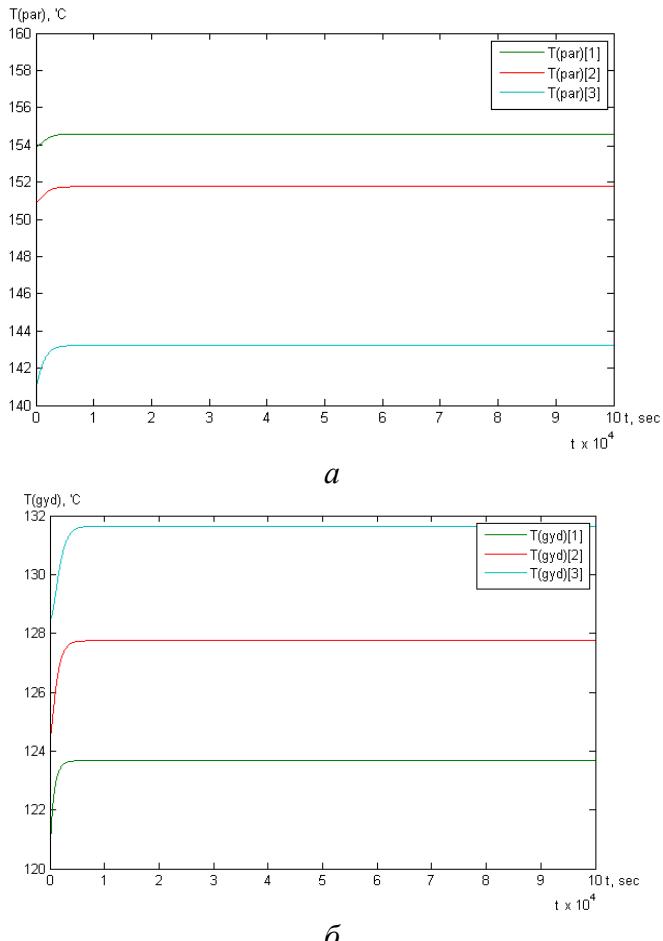


Рисунок 4 – Графики переходных процессов нелинейной системы в различных узлах сеток:
a – для пара, *б* – для жидкости

Сравнительный анализ графиков, полученных с помощью линейной и нелинейной систем показал, что характер моделируемых процессов не изменяется. Однако для паровой фазы очевидно влияние нелинейной зависимости скорости пара от температуры. Это проявляется в изменившихся значениях установившихся процессов, которые имеют погрешность в два порядка после запятой. Для жидкости процессы в соответствующих точках (узлах) практически не изменились.

Разностная схема тепломассообменного процесса. Для более точного описания технологического процесса происходящего в РК, на основании непрерывной динамической математической модели взаимосвязанных тепломассообменных процессов, описанной в [1], предложена взаимосвязанная ММ:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_{\text{ц.п}}}{\partial t} &= \nu_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) \frac{\partial C_{\text{ц.п}}}{\partial z} + R_{\text{п}}(C_{\text{ц.п}} - EC_{\text{ц.ж}}), \\ \frac{\partial C_{\text{ц.ж}}}{\partial t} &= -\nu_{\text{ж}} \frac{\partial C_{\text{ц.ж}}}{\partial z} - R_{\text{ж}}(C_{\text{ц.п}} - EC_{\text{ц.ж}}), \\ \frac{\partial \theta_{\text{п}}}{\partial t} &= -\nu_{\text{п}}(\theta_{\text{п}}) \frac{\partial \theta_{\text{п}}}{\partial z} - R_{\theta_{\text{п}}}(\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ж}}), \\ \frac{\partial \theta_{\text{ж}}}{\partial t} &= \nu_{\text{ж}} \frac{\partial \theta_{\text{ж}}}{\partial z} + R_{\theta_{\text{ж}}}(\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{ж}})\end{aligned}$$

Разностная ММ взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов представлена ниже, получена в результате объединения теплообменной и массообменной моделей через параметры $\gamma = \frac{a\theta_0}{h}$, $\gamma(\theta_p) = \frac{a\theta_p^{i+1}}{h}$, $\gamma_2 = \frac{b\tau}{h}$.

$$\begin{aligned}X_{n+1}^i &= -X_n^i(\gamma\tau - 1 - \gamma(Z_n^i)\tau - R_p\tau) + \gamma\tau X_n^{i-1} - \gamma(Z_n^i)\tau X_n^{i+1} - R_p\tau Y_n^j, \\ Y_{n+1}^i &= -Y_n^i(\gamma_2 - 1 - R_g\tau) + \gamma_2 Y_n^{i-1} - R_g\tau X_n^j, \\ Z_{n+1}^i &= -Z_n^i(\gamma\tau - 1 - \gamma(Z_n^i)\tau + R_{\theta_p}\tau) + \gamma\tau Z_n^{i-1} - \gamma(Z_n^i)\tau Z_n^{i+1} + R_{\theta_p}\tau D_n^j, \\ D_{n+1}^i &= -D_n^i(\gamma_2 - 1 + R_{\theta_g}\tau) + \gamma_2 D_n^{i-1} + R_{\theta_g}\tau Z_n^j.\end{aligned}$$

Результаты моделирования этой системы представлены на рис. 5.

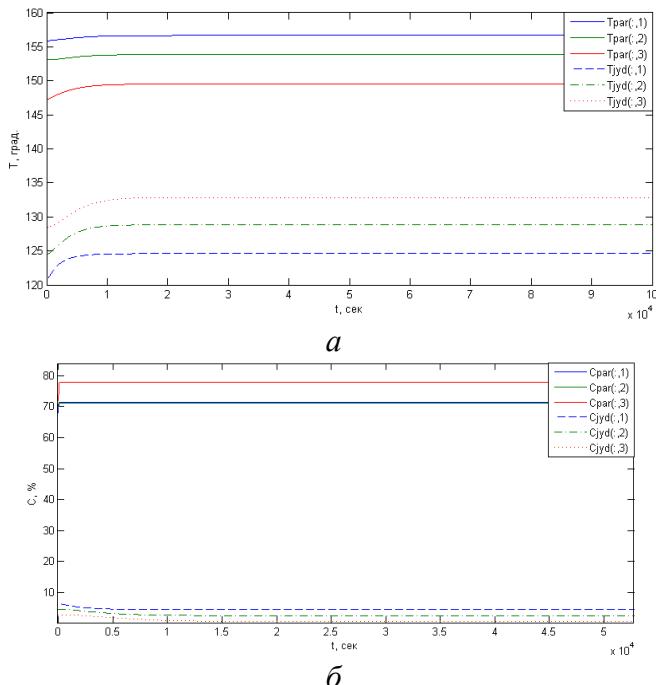


Рисунок 5 – Графики переходных процессов взаимосвязанного тепломассообмена:
а – теплообмен, б – массообмен

Анализ графиков системы взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов показывает, что характер моделируемых процессов не меняется, а имеющаяся погрешность (0,5 градуса для теплообмена и 8% для массообмена) не является критичной.

Для удобства исследования разработан программный модуль на языке программирования C++, предназначенный для визуализации и исследования нелинейных тепломассообменных процессов, происходящих в РК. Данный модуль позволяет моделировать тепло- и массообменные процессы, представленные ДУЧП первого порядка, быстрее существующих на данный момент программных средств, например Matchad, Wolfram Mathematica.

Выводы. Проведено исследование взаимосвязанных тепломассообменных процессов регенерации абсорбента с помощью разработанной разностной математической модели, реализованной на основе конечномерных методов. По результатам исследования выполнен сравнительный анализ линейной и нелинейной математических моделей, который показал, что разностные модели могут применяться вместо непрерывно-дискретных для описания данного класса технологических процессов. Предложен новый способ моделирования данного класса технологических процессов, сравнительно быстрый и простой в реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Математическое моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. 160 с.
2. Исакович Р.Я., Логинов В.И., Попадько В.Е. Автоматизация производственных процессов нефтяной и газовой промышленности. 1983. – 424 с.
3. Моделирование систем управления: учеб. пособие. / Душин С.Е., Красов А.В., Кузьмин Н.Н.; Под ред. С.Е. Душина. – М.: Студент, 2012. – 348 с.

Абрамкин Сергей Евгеньевич, Душин Сергей Евгеньевич, Сирота Даниил Дмитриевич

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. На протяжении существования нефтегазовой промышленности в этой отрасли доминировали электронные первичные преобразователи. В настоящее время существуют альтернативы электронным датчикам. Одной из них является применение волоконно-оптических датчиков. Целью этой работы является рассмотрение и анализ технологии волоконно-оптических измерительных систем в условиях нефтегазовой отрасли. В соответствии с целью были поставлены следующие задачи: разобрать принцип действия волоконно-оптических измерительных систем и их устройство; проанализировать возможности данной технологии применительно к нефтегазовой промышленности.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, нефтегазовая промышленность, инструмент улучшения системы разработки, электронные датчики, оптоволоконные системы.

Annotation. During the existence of the oil and gas industry, electronic primary converters dominated this area. Currently, there are alternatives to electronic sensors. The purpose of this work is to review and analyze the technology of fiber-optic measuring systems in the oil and gas industry. In accordance with the goal, the following tasks were set: to understand the principle of operation of fiber-optic measuring systems and their arrangement; analyze the capabilities of this technology in relation to the oil and gas industry.

Keywords: fiber optic sensors, oil and gas industry, tool for improving the development system, electronic sensors, fiber optic systems.

Введение

На современном этапе развития разработки месторождений углеводородов (УВ) возрастает сложность пополнения запасов, истощаемых растущим спросом на энергоресурсы. Добыча нефти в основных нефтегазоносных районах России, а также в зарубежных нефтегазоносных провинциях вступила в период больших изменений. Открытия гигантских нефтяных и газовых месторождений представляются маловероятными. В связи с этим, экономически оправданная разработка существующих и вновь вводимых ресурсов нефти и газа требует углубленного понимания уникальной геологической природы, характера залежей, а также совершенствования систем разработки и технологий извлечения углеводородов.

Большое значение в процессе извлечения углеводородов играют измерительные устройства, в особенности их надежность, точность и долговечность. Условия окружающей и контролируемой сред, в которых один или несколько внешних воздействующих факторов (температура, давление, агрессивность, влажность, деформация) имеют предельно возможные постоянные значения, принято считать экстремальными. В таких условиях работают первичные преобразователи систем управления нефтедобычей. Стандартные электронные датчики (ЭД) применяются в экстремальных условиях, однако они восприимчивы к электромагнитным излучениям (шумы и помехи в измерительном сигнале), а также большинство материалов электроники накладывают ограничение на температурный диапазон работы.

Электронные датчики имеют существенные недостатки:

- требуют электропитания и заземления в зоне измерений и, соответственно, взрыво- и пожаробезопасного исполнения;
- требуют совмещенной конструкции чувствительного элемента и электронного преобразователя в жестких условиях зоны измерений;
- принцип совмещенного построения не позволяет разнести чувствительный элемент и электронный блок на расстояние более нескольких метров;

—неспособность к самотермокомпенсации и самокалибровке, поскольку ЭД принципиально являются одноканальными преобразователями физической величины в электрический сигнал [1].

Почти полвека на рынке измерительных систем и датчиков, применяемых при мониторинге добычи углеводородов, доминируют электронные измерительные технологии, которые предполагают преобразование измеряемого параметра в электрический сигнал и последующую его обработку (электродинамический, электромагнитный, пьезокерамический и др.). Современной альтернативой этому традиционному подходу является использование волоконно-оптических измерительных систем, в которых измеряемый параметр преобразуется в оптический сигнал, передающийся по оптоволокну [2].

Волоконно-оптические датчики имеют следующие, обусловленные их физической природой, преимущества: измерение теплового поля и/или поля давления (профиля) по длине ствола скважины в режиме реального времени (РРВ); абсолютная взрывопожаробезопасность; устойчивость практически ко всем горючим и агрессивным средам; расширенный диапазон рабочих температур; высокая механическая прочность и надежность; распределенные, многодатчиковые измерения; высокое быстродействие; длительный срок службы; малые габариты и гибкость; мультиплексирование большого массива датчиков одного оптоволокна; помехозащищенность от электромагнитных воздействий; полная оптическая гальваническая развязка с электронной аппаратурой [1].

Устройство и принцип действия волоконно-оптических датчиков

Поскольку оптическое излучение является электромагнитным излучением с длинами волн примерно от 0,1 до 10 мкм, взаимодействующее со средой в процессе распространения, то его поведение подчиняется законам электромагнитного взаимодействия и описывается волновыми функциями, являющимися решениями системы уравнений Максвелла [3].

Основным действующим элементом волоконно-оптических измерительных систем является оптическое волокно. Современное оптическое волокно состоит из сердцевины, по которой распространяется свет, и оболочки (рис. 1). Оптоволокно является одновременно и распределенным датчиком температуры (давления), и каналом передачи информации. Сердцевина представляет собой нить из пластика или стекла с определенными добавками для повышения коэффициента преломления.

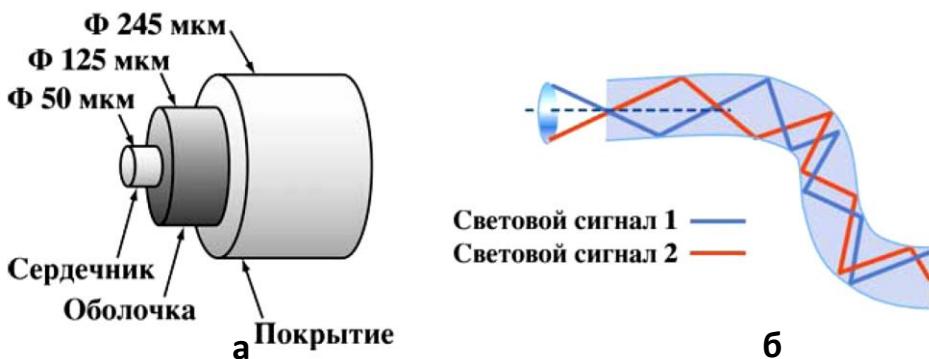


Рисунок 1 – *а)* строение оптоволоконного кабеля; *б)* распространения световых сигналов

Явление полного внутреннего отражения. Физической основой распространения оптического излучения по оптическому волокну является явление полного внутреннего отражения (ПВО) света от границы раздела двух сред с различными показателями преломления. Для создания условий ПВО в оптическом волокне показатель преломления сердцевины n_c обеспечивают большим по величине, чем показатель преломления оболочки n_{ob} .

Явление ПВО при этом наблюдается только для лучей, падающих на границу «сердцевина–оболочка» под углом, равным или большим угла ПВО и состоит в том, что при условии ПВО преломленный луч скользит по границе раздела сред и при этом практически вся энергия падающего луча передается отраженному лучу, который испытывает серию повторных отражений

под углами ПВО и распространяется вдоль по оптическому волокну. Угол ПВО θ_n , вычисляется по закону Снеллиуса:

$$\theta_n = \arcsin \frac{n_{об}}{n_c}. \quad (1)$$

Например, если $n_c = 1,48$ и $n_{об} = 1,46$, то по (1) получаем значение угла ПВО $\theta = 80,6^\circ$.

При падении оптических лучей под углами, меньшими чем угол ПВО возникают преломленные лучи, которые, падая на границу «сердцевина–оболочка», могут отражаться от границы с внешней средой и распространяться по оболочке или преломляться, выходя во внешнюю среду [3].

Числовая апертура. Поскольку сердцевина оптического волокна имеет конечный диаметр d_c , в оптическое волокно попадает пучок лучей, образующих входной конус с углом при вершине $2\Phi_a$, определяемым так называемой числовой апертурой NA (эквивалентом половинного угла при вершине конуса, равного апертурному углу Φ_a):

$$NA = \sin \varphi_a = \sqrt{n_c^2 - n_{об}^2}. \quad (2)$$

Оптические лучи, которые попадают под углом $\Phi < \Phi_a$ называют апертурными, которые в силу действия закона ПВО, распространяются по волокну. Лучи, для которых $\Phi > \Phi_a$ начинают распространяться по волокну, но постепенно затухают, так как при многократном отражении отдают часть энергии преломленному лучу, выходящему из сердцевины в оболочку. Эти лучи являются внеапертурными и делятся на те, которые распространяются по оболочке, и те, которые выходят за границы волокна.

В оптически однородной и изотропной среде в результате интерференции (наложения) первичной и вторичных волн образуется проходящая волна, фазовая скорость которой V_ϕ зависит от частоты. Электрические и магнитные свойства вещества оптического волокна, определяющие его взаимодействие со световой волной, характеризуются относительными диэлектрической и магнитной проницаемостями ϵ , μ и удельной проводимостью.

Фазовая скорость волны при этом определяется соотношением:

$$V_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = \frac{c}{n(\omega)}. \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме, а $n(\omega)$ – показатель преломления среды, зависящий от частоты. Из (3) видно, что фазовая скорость обратно пропорциональна показателю преломления среды n , который собственно и зависит от частоты [3].

Моды колебаний оптических волн. На уровне электромагнитного взаимодействия с молекулами учитываются пространственные электрические E и магнитные H поля и явления поляризации как электрической P , так и магнитной B , допускающие колебания соответствующих векторов (E , H) только в определенных плоскостях, что приводит к появлению в оптическом волокне многих типов колебаний, или мод. Условие распространения – длина волны света λ_c в оптоволокне имеет порядок 1 мкм, а диаметр световода $d_c = 10 - 100$ мкм ($\lambda_c \ll d_c$).

Типы колебаний – моды – определяются решениями системы уравнений Максвелла. При этом световод можно представить идеальным цилиндром с продольной осью Z (точка Z_0 считается

началом световода), оси x и y в поперечной (xy) плоскости образуют горизонтальную (xz) и вертикальную (xz) плоскости. В этой системе существуют 4 класса волн (E и H ортогональны):

$$\text{–поперечные } T: E_z = H_z = 0; \quad E = E_y; \quad H = H_x;$$

$$\text{–электрические } E: E_z \neq 0, H_z = 0; \quad E = (E_y, E_z) \quad \text{распространяются в плоскости } (yz);$$

$$\text{–магнитные } H: H_z \neq 0, E_z = 0; \quad H = (H_x, H_z) \quad \text{распространяются в плоскости } (xz);$$

$$\text{–смешанные } EH \text{ или } HE: E_z \neq 0, H_z \neq 0; \quad E = (E_y, E_z), H = (H_x, H_z)$$

распространяются в плоскостях (xz) и (yz).

При решении системы уравнений Максвелла удобнее использовать цилиндрические координаты (z, r, φ), при этом решение ищется в виде волн с компонентами H_z, E_z вида:

$$E(r, \omega) = A(\omega) \cdot F(\rho) \cdot x \cdot e^{im\omega} x \cdot e^{-\beta z}, \\ H(r, \omega) = B(\omega) \cdot F(\rho) \cdot x \cdot e^{im\omega} x \cdot e^{-\beta z}. \quad (4)$$

где $A(\omega)$ и $B(\omega)$ – нормирующие постоянные, $F(\rho)$ – искомая функция, β – постоянная распространения моды.

Решения для $F(\rho)$ получаются в виде наборов из m (появляются целые индексы m) простых функций Бесселя $J_m(K_{ob}\rho)$ для сердцевины и модифицированных функций Бесселя $K_m(K_{ob}\rho)$ для оболочки. Параметр β определяется как решение характеристического уравнения, получаемого из граничных условий, требующих непрерывности тангенциальных составляющих компонент E_z и H_z поля на границы «сердцевина – оболочка». Характеристическое уравнение, в свою очередь, дает набор из n решений (появляются целые индексы n) для каждого целого m , т.е. имеем β_{mn} собственных значений, каждое из которых соответствует определенной моде. В результате формируется набор (матрица $m \times n$) мод, перебор которых основан на использовании двойных индексов.

В оптическом волокне существуют два типа мод HE_{mn} и EH_{mn} . При $m > 0$ имеем гибридные моды, а при $m = 0$ – поперечные моды TE_{01} и TH_{01} . Моды, соответствующие апертурным лучам, называются направляемыми, а соответствующие внеапертурным лучам – излучающими. Часть внеапертурных лучей распространяется в оболочке, соответствующие им моды иногда называют оболочечными.

Эти моды играют определенную роль в уменьшении дисперсии волокон с плавным изменением профиля показателя преломления и со сдвигом дисперсии.

Чем меньше диаметр d_c , тем меньше сечение светового потока, поступающего в оптическое волокно, тем меньше различных типов колебаний (обусловленных множеством решений уравнения Максвелла), или мод, возникает в оптоволокне. Волокно, в котором распространяется несколько мод, называется многомодовым оптическим волокном (МОВ), а волокно, в котором распространяется одна мода – одномодовым оптическим волокном (ООВ). Для промышленно выпускаемых оптических волокон ООВ имеет диаметр 7–10 мкм, а МОВ – 50; 62,5; 85 и 100 мкм В ООВ поддерживается только одна гибридная мода HE_{11} , называемая основной модой, в МОВ поддерживаются различные, как поперечные, так и гибридные, моды [3].

Волоконно-оптические системы измерения в нефтегазовой промышленности

При добыче и транспортировке углеводородов актуальными являются волоконно-оптические системы измерения температуры и давления. Температурные воздействия инициируют вибрации в молекулярной решетке оптических волокон датчика. Когда свет попадает на термически возбужденные молекулы, происходит взаимодействие между световыми частицами (фотонами) и электронами. Таким образом, в оптическом волокне происходит световое рассеяние, так же известное, как рамановское рассеяние (см рис. 2). Обратное световое рассеяние состоит из нескольких спектральных составляющих: рэлеевского рассеяния, стоксовых компонентов рамановского рассеяния и антостоксовых компонентов рамановского рассеяния. Интенсивность рассеяния так называемого антостоксова диапазона зависит от температуры, в то время как, стоксов диапазон от температуры практически не зависит. Локальная температура оптического волокна выводится из отношения антостоксовой и стоксовой интенсивностей света [4].

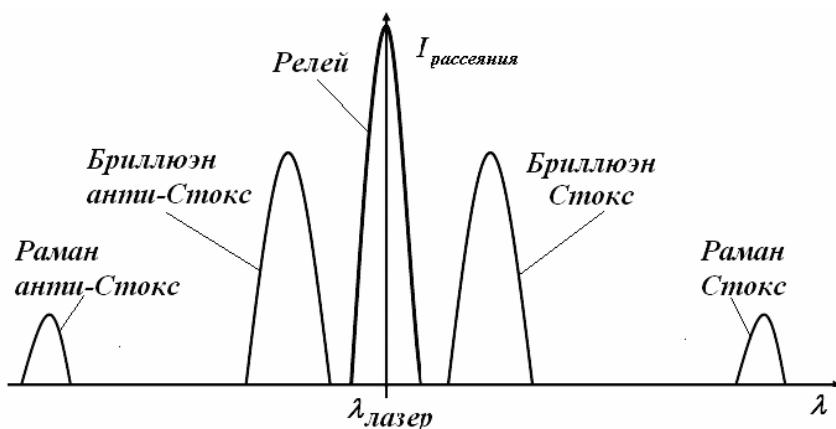


Рисунок 2 – Характеристики обратного рассеяния Рэлея, Бриллюэна и Рамана

Механизм измерения заключается в том, что интенсивность лазера в течение времени измерения модулируется синусоидально, а частота — в виде линейной частотной модуляции. В любой точке вдоль волокна возникает комбинационный рассеянный свет, часть которого возвращается к блоку формирования сигнала [5]. Затем выполняется спектральная фильтрация света обратного рассеивания, его преобразование в измерительных каналах в электрические сигналы, усиление и электронная обработка. Посредством преобразования Фурье, в качестве промежуточного результата получают кривые комбинационного обратного рассеивания как функцию длины кабеля, амплитуда которых пропорциональна интенсивности соответствующего комбинационного рассеивания. Из отношения кривых обратного рассеивания получают температуру волокна вдоль световодного кабеля. Датчики температуры могут быть выполнены не только на основе эффекта Рамана, но и на основе волоконного интерферометра Фабри–Перо [6].

Пространственное разрешение рамановских ВОД температуры составляет порядка 1 м. Возможно обеспечение разрешения 0,5 и 0,25 м за счет снижения точности измерения температуры [7]. Точность измерения температуры порядка 1°C. При увеличении времени накопления интенсивностей достижима точность 0,3 °C и разрешение до 0,05 °C. Также измерять температуру можно на основе технологии ВОД на дифракционных решетках.

При измерении давления используется оптоволоконные датчики отражательного типа; в нем используется изменение условия отражения света мемброй. Конструктивно датчик состоит из волоконно-оптического жгута, к одному из торцов которого через небольшой зазор (~ 100 мкм) подсоединенна мембрана. В центре жгута размещаются приемные оптические волокна, а по краям — зондирующие [8]. Коэффициент связи между зондирующими и приемными волокнами изменяется в зависимости от давления, оказываемого на мембрану. Для повышения точности измерения давления на мембрану наносится фотолюминесцентный материал, обеспечивающий излучение опорного светового сигнала, интенсивность которого практически не зависит от величины давления. Об измеряемой величине давления в таких приборах обычно судят по изменению амплитуды и поляризации проходящего через чувствительный элемент света [9].

Дифракционные (спектральные) волоконно-оптические датчики

Волоконная решетка показателей преломления (ПП) представляет собой участок оптического волокна (как правило, одномодового), в сердцевине которого наведена периодическая структура ПП с периодом L , имеющая определенное пространственное распределение, схематически показанное на рис. 3 [10]. Как правило, решетка формируется в фоточувствительной сердцевине оптического волокна 1, в то время как ПП кварцевой оболочки 2 остается неизменным. Такая структура обладает уникальными спектральными характеристиками, которые и определяют ее широкое применение в различных устройствах волоконной оптики. Наиболее важным свойством волоконных брэгговских решеток является узкополосное отражение оптического излучения, относительная спектральная ширина которого может составлять 10^{-6} и меньше [11].

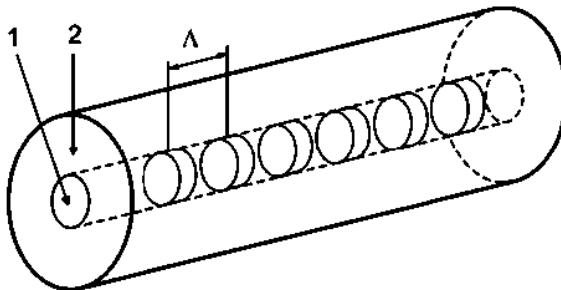


Рисунок 3 – Структура волоконной решетки показателя преломления

Важным свойством ВОД на основе дифракционных решеток является возможность одновременного измерения величин воздействия температуры T и давления P с последующим пересчетом их разделением. Для однозначного пересчета (разделения) значений T и P по измеренным значениям $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ необходимо различие коэффициентов чувствительности этих решеток k_{P1} , k_{T2} к воздействиям [12]. Простейшими вариантами разделения измеряемых параметров являются случаи, когда чувствительность к одному из воздействий вообще отсутствует. Действительно, пусть каждая решетка чувствительна к одному из воздействий и нечувствительна к другому: $k_{P1} = 0$, $k_{T2} = 0$ (или наоборот). При этом две решетки являются двумя независимыми датчиками, а пересчет T и P производиться независимо через соответствующее значение $\Delta\lambda_{1i}$ и $\Delta\lambda_{2i}$:

$$T = T_0 + \frac{\Delta\lambda_1}{k_{T1}}, \quad P = P_0 + \frac{\Delta\lambda_2}{k_{P2}} - \frac{\Delta\lambda_1 k_{T1}}{k_{T1} k_{P1}}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в выражении для P представляет собой пересчет сдвига λ_2 как вызванного давлением, а второй – вычитания вклада от изменения температуры, определенной по верхнему выражению. Приведенные в ходе рассмотрения выражения позволяют исходя из конкретной оценки $\delta\lambda$ и значений k_{T1} , k_{P1} и k_{T2} , k_{P2} получить оценки точности измерения T и P [12].

Скважинные волоконно-оптические датчики

Впервые волоконно-оптический датчик был установлен в скважине в 1996 г. Ведущими зарубежными компаниями, работающими с оптоволоконными датчиками, являются Schlumberger, Shell, Halliburton. Компания Schlumberger установила такие датчики более чем в 300 скважинах с общей длиной оптоволокна более 600 км [13].

Волоконно-оптический скважинный датчик позволяет производить измерения профиля температур в скважине в диапазоне от -40 до $+350$ °C, с погрешностью измерений ± 1 °C. Он обеспечивает распределенную систему замера через 1 м, на глубину до 5000 м.

Датчик температуры или давления представляет собой одномодовое или многомодовое оптоволокно, защищенное снаружи оболочкой из стальных проволок. Такая конструкция датчика в виде несущего кабеля обеспечивает ему хорошую гибкость и, одновременно, высокую прочность на разрыв, при удельном весе – около 350 г/м. Оптоволоконный датчик может устанавливаться и в добывающие, и в нагнетательные скважины. Оптоволоконный кабель монтируется на внешней стороне колонны НКТ или на внешней стороне обсадной эксплуатационной колонны. При установке оптоволоконного кабеля на колонне НКТ срок службы системы соответствует межремонтному периоду работы скважины от 1 до 5 лет; при установке кабеля на эксплуатационной колонне – сроку жизни скважины до 20–30 лет. При монтаже на внешней стороне колонны НКТ защищенное оптоволокно прокладывается вдоль перфорированного участка трубы. Оптоволокно пропускается через конструктивные элементы внутристекажинного оборудования (пакер) и вдоль корпуса погружного насоса с электроприводом. При монтаже оптоволоконного кабеля на внешней стороне эксплуатационной колонны последняя монтируется выше кровли продуктивной толщи пласта по технологии манжетного цементирования. Нижняя часть колонны в зоне продуктивной толщи оборудуется секционными фильтрами. Оптоволокно прокладывается по внешней стороне колонных фильтров с проходом через конструктивные элементы управляемых пакеров, муфты и пакера манжетного цементирования. Стальная трубка для размещения оптоволокна, монтируется на внешней стороне труб обсадной колонны выше узла манжетного цементирования и цементируется вместе с колонной. Время замера профиля температуры и/или давления одной скважины – 2 мин [13].

Как сказано выше, одной из отличительных особенностей оптоволоконных датчиков в сравнении с традиционными методами термопьезометрии, является возможность мониторинга скважин в режиме реального времени.

Для обеспечения мониторинга скважин с использованием оптоволоконной технологии в РРВ используют следующее оборудование:

- погружной оптоволоконный (бронированный) кабель;
- блок сбора и обработки данных;
- устройевой кабельный интерфейс для вывода кабеля на поверхность;
- кабельные разъемы;
- мандрель НКТ для оптоволоконного датчика.

Погружной бронированный оптоволоконный кабель позволяет получать и передавать на поверхность непрерывную и высокоточную информацию о следующих параметрах скважины: давление, температура, расход, фазовый состав смеси, распределенная температура в стволе скважины, сейсмические данные. Стандартный кабель состоит из двух одномодовых (для измерения давления, расхода и сейсмических вибраций) и одного многомодового волокна для измерения температуры по стволу скважины [14].

Проведение исследования и мониторинга скважин в режиме реального времени позволяет:

- контроль работы пластов в процессе добычи и нагнетания при стационарных и динамических режимах работы скважины;
- контроль динамики перемещения межфлюидных контактов;
- мониторинг движения флюида по НКТ с целью определения зон возможного образования парафиновых и газогидратных пробок;
- мониторинг технического состояния эксплуатационной колонны и колонны НКТ, определение зон негерметичности и заколонных перетоков;
- мониторинг работы погружного насоса или системы клапанов газлифта.

По данным компании «Sensa», которая сегодня является одним из лидеров внедрения оптоволоконных технологий, только за счёт использования информации в режиме реального времени, компания добилась повышения продуктивности ряда скважин в Мексиканском заливе на 36 % [13].

Заключение

Таким образом, применение волоконно-оптических измерительных систем (ВОИС) в условиях месторождений углеводородов, а также газопроводов (нефтепроводов) может показывать себя значительно эффективнее, чем электронные датчики. Они более долговечны, не требуют калибровок и устойчивы к агрессивным воздействиям. Более того, ВОИС позволяют использовать информацию в режиме реального времени, позволяя совершенствовать системы разработки месторождений, предупреждать возникновение аварийных ситуаций и, в конечном счете, повышать коэффициент извлечения углеводородов, что в настоящее время является одной из основных задач нефтегазовой промышленности. Включая все вышеперечисленное, следует подчеркнуть, что волоконно-оптические датчики целесообразно применять при разработке распределенных систем телемеханики кустов газовых (нефтяных) скважин. Так как их можно задействовать в системе телеизмерения и организовать на их основе систему распределенного управления процессами добычи и транспортировки углеводородов по внутренним трубопроводам установок подготовки и по магистральным трубопроводам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буймистрюк Г. Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // CONTROL ENGINEERING Россия, #3 (45) 2013
2. Томышев К.А., Баган В.А., Астапенко В.А. Распределённые волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности. ТРУДЫ МФТИ. — 2012. — Том 4, № 2
3. Буймистрюк Г.Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем. СПб, ГРОЦ Минатома, 2004 -198 с.
4. Кузнецова Е.Ю. Стукач О.В. Волокно-оптический датчик измерения температуры. XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных, 2014.
5. Бенуэлл К. Основы молекулярной спектроскопии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 384 с.
6. Тартаковский, Д Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учебник для вузов М.: Высшая школа, .2002. – 201 с
7. “Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring.” 11th SPIE Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, March 14-18, 2004, San Diego, California, USA, Proc. SPIE Vol. 5384, pp.18 -25.
8. Жижин В.И. Волоконно-оптические датчики: перспективы промышленного применения // Время электроники, 2016.
9. Овчинников А., Макарецкий Е. Оптоэлектронный измеритель давления на основе многослойных оптических структур, Компоненты и технологии, №10, 2006
10. Варжель С.В. , Волоконные брэгговские решетки. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.
11. НЦВО – Фотоника. Волоконные брэгговские решетки для волоконных лазеров с длиной волны 1064 нм, Спецификация // http://www.forc-photonics.ru/ru/fiber_gratings/FBG_gratings/1/47
12. Гавричев В.Д. Волоконно-оптические измерители для работы в условиях сильных электромагнитных помех, Санкт-Петербург – 2015
13. Еремин Н.А. Управление разработкой интеллектуальных месторождений нефти и газа: Учеб. пособие для вузов: В 2 кн. Кн. 1. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 200 с.: ил.
14. Гаричев С.Н. Ерёмин Н.А., Технология управления в режиме реального времени : учеб. пособие. В 2 ч. 1 - М.: МФТИ, 2015.- ч. 1. - 196 с. : ил.

Абрамкин Сергей Евгеньевич, Душин Сергей Евгеньевич, Федоров Михаил Степанович

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПОДГОТОВКОЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Аннотация. Цель – оценка состояния и перспективы развития автоматизации и управления объектами газовой отрасли. Результаты: предложена концепция построения киберфизических систем управления технологическими процессами на основе платформы разработки Цифровых двойников. Разработаны и исследованы новые математические модели управляемых абсорбционных процессов осушки природного газа. Представлена структура многорежимного управляющего устройства, используемого в процессе абсорбционной осушки.

Ключевые слова: природный газ, осушка, абсорбция, киберфизическая система, цифровая модель, массообмен, теплообмен, математическое моделирование, объект управления с распределенными параметрами, управляемый технологический процесс, многорежимное регулирование.

Annotation. to assess the state and prospects for the development of automation and management of gas industry facilities. Results: The concept for cyberphysical control systems for technological processes based on Digital Twin Platform was proposed. New mathematical models have been worked out in order to study controlled absorption processes while natural gas dewatering. The report presents structure of the multimode control device used in the process of absorption gas dewatering.

Keywords: Natural Gas; Dewatering; Absorption; Cyber-Physical System; Digital model; Mass Exchange; Heat Exchange; Mathematical Modeling; Controlled Object With Distributed; Controlled process; Multi-mode Control.

Введение

Освоение крупных газовых месторождений (Медвежье, Уренгойское, Ямбургское и т. д.) начатое в конце 70-х годов прошлого века позволило сформировать Единую систему газоснабжения [1]. Одновременно с этим осуществлялась стратегия развития процессов управления производственно-технологическим комплексом газовой отрасли.

Стратегия развития газовой отрасли состоит не только в совершенствовании технологических процессов (ТП), но и во внедрении современных систем автоматизации. В целом, автоматизация газовой отрасли осуществляется в соответствии с общемировыми тенденциями.

Объекты газовой отрасли различны по своему функциональному назначению. Они включают добычу природного газа, подготовку его к транспортировке, транспортировку по магистральным газопроводам, хранение в подземных хранилищах, переработку и т. п. Такие объекты характеризуются большим числом регулируемых, управляемых и контролируемых величин.

Газодобывающие предприятия (ГДП) отличаются друг от друга по следующим признакам: технологической структуре; способам сбора и обработки природного газа; степени рассредоточенности объектов на территории, принадлежащей ГДП (лицензионные участки); составу и типам технологического оборудования; режимам добычи и обработки газа, изменяющихся в процессе разработки месторождения.

Все вышеперечисленное определяет требования к автоматизированному управлению ГДП, среди которых следует выделить их гибкость, возможность постоянного развития и совершенствования.

В процессе разработки основных месторождений СССР в конце 80-х годов прошлого века была разработана многоуровневая система управления Единой системой газоснабжения. В основу ее была положена концепция развития АСУ ТП реального времени (РВ). Однако, реализация данной концепции начала осуществляться, только в начале 2000-х годов.

Состояние автоматизации в газовой отрасли. Рассмотрим развитие автоматизации и управления на примере ГДП, находящегося в районе Крайнего Севера. Первоначально технологические установки оснащались локальными регуляторами и автономными средствами измерения. Затем им на смену пришли системы пневмоавтоматики и громоздкие телемеханические системы. Следующий этап – централизованные АСУ ТП. Например, на объектах Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (УНГКМ), они были построены на базе специализированного управляющего вычислительного комплекса типа «Электроника-60». Примерно в середине 90-х годов прошлого века системы управления стали реализовывать на промышленных *IBM*-совместимых компьютерах. Это было обусловлено резким падением цен на персональные компьютеры и комплектующие изделия. Также на рынке появились универсальные прикладные программные средства типа *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition* – супервизорное/диспетчерское управление и сбор данных) и средства программирования контроллеров, построенных на базе *IBM*-совместимых компьютеров. В частности, на объектах УНГКМ были внедрены промышленные персональные компьютеры типа *ROBO*, производства ЗАО «Индустриальные компьютерные системы», которые пришли на смену управляющему вычислительному комплексу «Электроника-60». Одновременно с этим началось применение цифровых микропроцессорных датчиков и внедрение локальных программируемых логических контроллеров – *PLC* (*Programmable Logic Controller*).

Одной из сфер применения *PLC* на ГДП стали системы телемеханики процессов добычи и транспортировки природного газа. В этих системах *PLC* являются контролируемыми пунктами и получили название *RTU* (*Remote Terminal Unit* – удаленное терминальное устройство). Такие системы были снабжены коммуникационными модулями и программным обеспечением, предназначенными для реализации протокола передачи данных по физическим линиям или радиоканалам.

В 2000-х годах при вводе в эксплуатацию новых объектов на УНГКМ (валанжинской залежи газоконденсатного промысла №11, Песцовой площади, ачимовских залежей) для управления ими были внедрены *DCS*-системы (*Distributed Control System* – распределенные системы управления). Эти программно-технические комплексы включали в себя контроллеры разных производителей, связанных между собой с помощью открытых коммуникационных систем.

Следует отметить, что применение для диспетчерского дистанционного управления ГДП изменило информационно-программное и аппаратное обеспечение на качественном уровне, которого, однако, недостаточно, так как до сих пор отсутствуют математические модели и алгоритмы управления, охватывающие всю совокупность объектов ГДП. Кроме того, добыча природного газа, характеризуется отсутствием единого подхода к разработке месторождения между геологической, диспетчерской и производственной службами ГДП.

Программно-технические комплексы, разрабатываемые в настоящее время, реализуют две функции: проектирования системы управления и управления ТП в режиме РВ, т. е. представляют собой интегрированные системы [2]. Подробно развитие различных способов реализации АСУ ТП, в том числе и для объектов ГДП, изложены в [3]–[8].

На сегодняшний день интегрированные системы управления ТП разрабатываются по двум направлениям:

– *SCADA*-системы, построенные на базе *PLC* с встроенным пакетом программирования и автоматизированным рабочим местом оператора, оснащаемые *SCADA*-пакетом человека-машинного интерфейса, например, система телемеханики кустов газовых скважин;

– *DCS*-системы с контроллерами, автоматизированным рабочим местом оператора, коммуникационным оборудованием и интегрированным программным обеспечением.

Перспективы развития автоматизации и управления технологическими объектами в газовой отрасли. В настоящее время в газовой отрасли происходят качественные изменения, обусловленные возрастанием объемов добываемого природного газа, которые требуют совершенствования методов управления ГДП, в частности, ТП добычи и подготовки природного газа. Эти процессы характеризуются [9]:

- неполнотой информации о физических свойствах продуктивного пласта;
- сложностью описания процессов движения многофазных смесей в продуктивном пласте;
- ограниченностью видов управляющих воздействий на процесс, проходящий в пласте;
- саморегулируемостью системы «пласт – скважины – газосборная сеть» в период бесштуцерной эксплуатации;
- зависимостью ТП подготовки газа от режима работы пласта и скважин;
- нестационарностью ТП подготовки газа, вызываемой аварийными режимами, климатическими условиями и т. д.;
- запаздыванием ТП подготовки газа, вызываемым прохождением фазовых потоков через трубопроводы.

При разработке современной АСУ ГДП необходимо использование всего предшествующего опыта создания систем управления ТП и на их основе выработка новых концепций. Некоторыми авторами [7], [10]–[12] за основу организации управления ТП ГДП предлагается взять современный подход «искусственного интеллекта». Такой подход соответствует концепции четвертой промышленной революции, или «Индустрини 4.0», представленной на Ганноверской выставке в 2011 г. Эта концепция прогнозирует массовое внедрение киберфизических систем в производственные процессы и предполагает их объединение в одну сеть на базе облачных технологий, работающую в режиме РВ, самонастраивающуюся и самообучающуюся новым моделям поведения. Таким образом, перспективой развития автоматизации и управления ТП в газовой отрасли является создание Цифрового производства, основанное на создании Цифровых моделей (ЦМ) (Цифровых двойников) ТП.

Использование концепции ЦМ для построения и эксплуатации современных систем управления сложными техническими объектами и ТП видится весьма перспективным по следующей причине. Существующий (традиционный) подход математического моделирования при проектировании систем управления основан на перенесении свойств адекватных (обоснованно адекватных) математических моделей (ММ), полученных аналитически или экспериментально, на физический объект, тем самым реализуя описательную, объяснительную и прогностическую функции моделей. Концептуальный подход построения ЦМ предполагает рассмотрение системы управления как нового объекта проектирования и эксплуатации более высокого уровня иерархии в виде киберфизической системы, представляющей собой взаимодействие физического объекта с его компьютерной моделью, т. е. Цифровым двойником. Цифровая модель системы управления при этом является неотъемлемой частью киберфизической системы управления, хотя физическая система должна работать и при отсутствии (отключении) Цифрового двойника. В этом случае ЦМ можно рассматривать как управляющее устройство (регулятор) для всей киберфизической системы более высокого уровня иерархии нежели контроллер, предназначенный только для управления физическим объектом. Таким образом, функции модели расширяются до управляющей.

Физическая система, состоящая из объекта управления (установки) и контроллера, и ее ЦМ должны быть динамически взаимосогласованы в соответствии с поставленной целью управления не только на этапе проектирования, но и непосредственно в процессе функционирования в режиме РВ (т. е. эксплуатации). По сути, здесь уместно говорить о синергетическом подходе, – теории самоорганизации неравновесных процессов, – рекомендуемом к практическому применению на современном этапе развития теории управления [13]. Именно такое системное образование двух взаимодействующих и взаимосвязанных динамических подсистем, стремящихся к самоорганизации, представляет собой киберфизическую систему.

Киберфизический подход на стадиях проектирования и эксплуатации систем управления предъявляет к ММ такие же требования, как и при решении задачи идентификации объектов в составе общей процедуры синтеза систем управления: на основе критериев функционального подобия формируется целевая «близость» ММ к реальным (физическим) объектам. Тем самым происходит разрешение системного парадокса Ротача. Для повышения эффективности степень близости должна устанавливаться на топологическом, структурно-операторном и параметрическом рангах неопределенности системы.

В рамках предложенной концепции рассмотрим процесс разработки Цифрового двойника для ТП абсорбционной осушки природного газа.

Разработка ММ управляемых ТП абсорбционной осушки природного газа.

Накопленный опыт в области разработки систем управления ТП подготовки газа к транспортировке позволяет сделать вывод, что ММ с сосредоточенными параметрами имеют низкую степень соответствия реальным объектам, так как не в состоянии адекватно отражать физику ТП и не позволяют формализовать все многообразие внешних факторов, существенно влияющих на показатели качества функционирования системы [14]–[17].

Одним из путей выхода из сложившейся ситуации является рассмотрение объектов и процессов с учетом их пространственной распределенности, что требует построения ММ на основе дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП). Примером таких объектов с распределенными параметрами являются установки комплексной подготовки газа с абсорбционной осушкой, широко применяемые на газовых месторождениях Крайнего Севера.

Для повышения эффективности управления процессом абсорбционной осушки природного газа целесообразно применять многорежимное регулирование, основанное на анализе большого массива данных о режимах работы технологической установки. С этой целью возможно использование аналитических систем, формируемых на базе разработанных ММ управляемых тепломассообменных процессов. Такие системы позволяют отследить скрытые ранее закономерности и использовать их как для проектирования разработки новых месторождений, так и для управления ТП ГДП в режиме РВ.

Большие Данные [18], [19] формируются в процессе эксплуатации газового месторождения на основе измерений большого количества величин ТП. Например, на газовом промысле производятся в режиме РВ измерения порядка 1100 физических величин, что за год составляет более 109 единиц данных. Эта информация накапливается в базах данных, и каждый месяц обрабатывается в специализированных лабораториях. На основе обработанных данных устанавливается технологический режим добычи газа для каждой установки. Однако на сегодняшний день не существует аналитической системы, которая позволяла бы эффективно обрабатывать эти данные с целью управления ТП.

Абсорбционная осушка природного газа, осуществляется по замкнутому циклу (по жидкой фазе) и состоит из ряда аппаратов, которые оказывают доминирующее влияние на ТП. При этом основным аппаратом является абсорбер, входящий в состав замкнутого (по жидкой фазе) контура абсорбционной осушки и определяющий в нем основные фазовые потоки. Так же доминирующее влияние на процесс оказывают ректификационная колонна (РК), испаритель и аппарат воздушного охлаждения (АВО), которые служат для регенерации абсорбента.

Динамические свойства абсорбционной осушки природного газа обусловлены:

1. Переходными процессами, вызванными пуско-наладочными работами или работами по перестройке оборудования.

2. Нестационарными процессами, обусловленными изменением внешних факторов.

Изучение физических закономерностей процессов абсорбционной осушки природного газа, учет конструктивных и технологических особенностей аппаратов, а также режимов их работы позволили разработать концептуальную модель комплекса как объекта управления [20]. Такая концептуальная модель³ взаимосвязанных физических процессов абсорбционной осушки природного газа была положена в основу составления динамических ММ управляемых массо- и теплообменных процессов в целом.

Модель управляемого массообменного процесса в насадочном абсорбере. При разработке таких ММ были приняты допущения, изложенные в [20]. С их учетом нелинейная

³ Здесь концептуальная модель – это абстрактная модель, которая определяет структуру моделируемого комплекса технологических систем, динамические свойства её элементов и причинно-следственные связи, присущие КТС и существенные для достижения цели моделирования.

динамическая ММ управляемого массообменного процесса в абсорбере записывается в виде системы ДУЧП:

$$\begin{aligned}\partial C_{\text{ЦГ}} / \partial t &= -v_{z\Gamma}(\bar{G}_\Gamma, \theta_\Gamma, p_\Gamma) \partial C_{\text{ЦГ}} / \partial z - R_\Gamma [C_{\text{ЦГ}} - C_{\text{ЦГ}}^p(C_{\text{ЦЖ}})]; \\ \partial C_{\text{ЦЖ}} / \partial t &= f(u) \partial C_{\text{ЦЖ}} / \partial z + R_{\text{Ж}} [C_{\text{ЦГ}} - C_{\text{ЦГ}}^p(C_{\text{ЦЖ}})], \\ 0 < z < l_a, \quad t > 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где $C_{\text{ЦГ}}$, $C_{\text{ЦЖ}}$ – концентрации целевого компонента (ЦК) в газе и жидкости;

$C_{\text{ЦГ}}^p$ – равновесная концентрация ЦК в газе; $v_{z\Gamma}(\bar{G}_\Gamma, \theta_\Gamma, p_\Gamma)$ – скорость газа вдоль оси z , которая зависит от внешних факторов (расхода, температуры и давления газа); l_a – высота абсорбера. Коэффициенты R_Γ и $R_{\text{Ж}}$ определяются физическими свойствами фаз и геометрическими особенностями аппарата. Управление процессом абсорбции осуществляется изменением подачи абсорбента в колонну, что отражено в модели введением управляющей функции $f(u)$, где u – сигнал управления, поступающий от регулятора.

Зависимость скорости газообразной фазы от изменения внешних факторов [20] определяется соотношением

$$v_\Gamma(\bar{G}_\Gamma, \theta_\Gamma, p_\Gamma) = \frac{V_m \bar{G}_\Gamma (\theta_0 + \theta_\Gamma) p_0}{(\pi/4) \theta_0 p_{\text{гр}} D^2},\tag{2}$$

где $V_m = 22,4$ – объем моля идеального газа при нормальных условиях, м³/кмоль; \bar{G}_Γ – расход газообразной фазы, кмоль/с; $\theta_0 = 273$ – нормальная температура, К; θ_Γ – рабочая температура газообразной фазы, °С; $p_0 = 0,1$ – нормальное давление, МПа; $p_{\text{гр}}$ – рабочее давление газообразной фазы, МПа; D – диаметр колонны, м.

Для ДУЧП (1), характеризующих изменения концентраций ЦК в газе и жидкости внутри абсорбера, следует учесть граничные условия на концах аппарата, а также, начальный профиль концентраций ЦК по высоте.

Результаты моделирования в управляемой системе при подаче возмущающих воздействий различного типа по скорости газа на входе абсорбера представлены на рис. 1. Графики переходных процессов соответствуют минимальному уровню возмущающих воздействий.

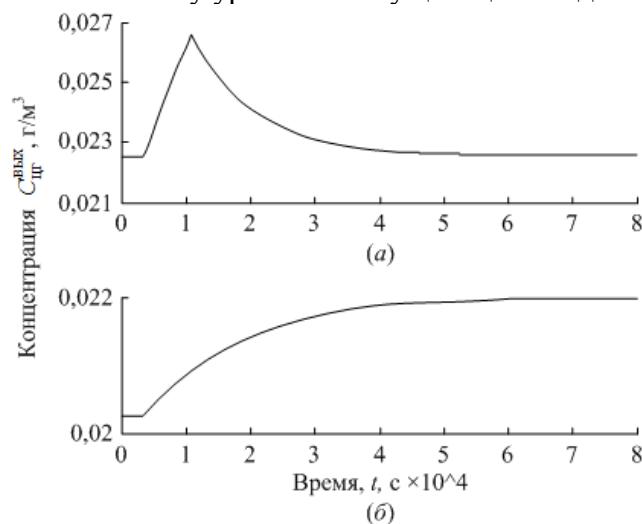


Рисунок 1 – Графики переходных процессов по концентрации ЦК в газе при прямоугольном импульсном (а) и ступенчатом (б) возмущениях

Модель управляемого теплообменного процесса в испарителе. Анализ работы РК [20] показал, что происходящий в ней ТП не является непосредственно управляемым. Управление процессом ректификации в РК осуществляется в испарителе и АВО.

Допущения, принятые для разработки ММ теплообменного процесса подсистемы «Выпаривание» представлены в [20]. С учетом принятых допущений ММ управляемого теплообменного процесса в испарителе имеет вид:

$$\begin{aligned}\partial\theta_{\text{дг}}/\partial t &= -f(u)(\partial\theta_{\text{дг}}/\partial x) - R_{\text{дг}}(\theta_{\text{дг}} - \theta_{\text{ст}}); \\ \partial\theta_{\text{ж}}/\partial t &= v_{\text{ж}}(\partial\theta_{\text{ж}}/\partial x) + R_{\text{ж}}(\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{ж}}); \\ d\theta_{\text{ст}}/dt &= R_{\text{дгст}}(\theta_{\text{дг}} - \theta_{\text{ст}}) - R_{\text{жст}}(\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{ж}}),\end{aligned}\quad (3)$$

где $\theta_{\text{дг}}$, $\theta_{\text{ж}}$, $\theta_{\text{ст}}$ – температуры дымовых газов, жидкой фазы и стенки; $v_{\text{ж}}$ – скорость жидкой фазы; $R_{\text{дг}}$, $R_{\text{ж}}$, $R_{\text{дгст}}$, $R_{\text{жст}}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств дымовых газов, жидкости и материала стенки жаровой трубы; $f(u) = v_{\text{дг}}(G_{\text{тг}}, G_{\text{в}})$ – функция управления; $G_{\text{тг}}$, $G_{\text{в}}$ – расход топливного газа и воздуха.

Для ММ (3) учитывались граничные условия дымовых газов на концах испарителя, а также начальные распределения температур теплоносителей.

Управление теплообменными процессами в испарителе осуществляется путем прямого регулирования температуры абсорбента $\theta_{\text{ж}}$ с помощью изменения соотношения расходов топливного газа $G_{\text{тг}}$ и воздуха на входе в горелку испарителя $G_{\text{в}}$.

Модель управляемых теплообменных процессов в аппарате воздушного охлаждения. С учетом допущений [20] ММ управляемого теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО приобретает вид:

$$\begin{aligned}\partial\theta_{\text{нп}}/\partial t &= -v_{\text{нп}}(\bar{G}_{\text{нп}}, \theta_{\text{нп}})(\partial\theta_{\text{нп}}/\partial x) - R_{\text{нп}}[\theta_{\text{нп}} - \theta_{\text{ст}}], \\ d\theta_{\text{ст}}/dt &= R_{\text{c1}}f(u) + R_{\text{c2}}\theta_{\text{нп}} - R_{\text{c}}\theta_{\text{ст}},\end{aligned}\quad (4)$$

где $\theta_{\text{нп}}$, $\theta_{\text{ст}}$ – рабочие температуры насыщенного пара и стенки трубного пучка АВО, °C; $v_{\text{нп}}$ – скорость насыщенного пара, м/с; $\bar{G}_{\text{нп}}$ – расход насыщенного пара, кмоль/с; $R_{\text{нп}}$, $R_{\text{c}} = R_{\text{c1}} + R_{\text{c2}}$ – физико-технологические коэффициенты, $f(u) = \theta_{\text{в}}(G_{\text{в}})$ – функция управления; $\theta_{\text{в}}$ – температура окружающей среды (воздуха); $G_{\text{в}}$ – расход воздуха.

Для ММ (4) также задаются граничные условия насыщенного пара на концах АВО, начальный профиль распределения температуры и значение температуры стенки трубного пучка в начальный момент времени.

Многорежимное управление. Предложенные ММ управляемых массо- и теплообменных процессов позволяют применить их для разработки и исследования систем управления КТС. Данному объекту управления присущи различные динамические ситуации⁴, обусловленные изменением как технологического режима установки и внешних факторов (расход, температура и давление газа), так и внутренних факторов. Внутренние возмущающие факторы проявляются при изменении с течением времени конструктивных особенностей, т. е. утончение стенок аппаратов, засорение проходных сечений трубопроводов и т. п. Для поддержания заданных величин в широком интервале изменения воздействий предлагается использовать концепцию многорежимного управления [21].

В соответствии с принципом многорежимного регулирования для каждого режима работы КТС устанавливается локальная цель регулирования и выбирается локальный закон регулирования с учетом ранее наработанных рекомендаций и сложившихся типовых решений на газовом промысле. В газовой промышленности для каждого типа технологических установок существуют базы данных и знаний по поддержанию заданного технологического режима, накопленные в процессе разработки месторождений.

⁴ Здесь динамическая ситуация – это совокупность больших данных, присущих текущему технологическому режиму, полученных от измерительной системы, из баз данных и баз знаний, на основе которых принимается решение о необходимости изменения режима функционирования объекта.

Использование концепции многорежимного регулирования применительно к технологическим установкам осушки газа основывается на обеспечении различных режимов их функционирования за счет подключения локального регулятора (регулятора режима, субрегулятора) из имеющегося набора режимных регуляторов в соответствии со сложившейся на данный момент времени динамической (технологической) ситуации. Изменение закона управления многорежимного регулятора происходит при получении определенного набора информативных признаков. Информативные признаки формируются на основе измеренных величин, характеризующих текущее состояние установки и состояние окружающей среды. Базируясь на полученной информации, многорежимный регулятор в соответствии с текущим технологическим режимом вырабатывает требуемый управляющий сигнал.

На рис. 2 представлена функциональная схема многорежимного регулятора. В структуру многорежимного регулятора входит набор локальных регуляторов и анализатор динамических ситуаций. Локальные регуляторы обслуживают соответствующие технологические режимы. Анализатор динамических ситуаций обрабатывает полученный набор информативных признаков текущей динамической ситуации и дает команду на включение соответствующего локального регулятора.

На схеме видно, что анализатор динамических ситуаций и локальные регуляторы обмениваются набором информативных признаков с источниками Больших Данных. Источниками Больших Данных в данном случае являются сигналы, поступающие из информационно-измерительной системы, хранилища баз данных и баз знаний. Анализатор динамических ситуаций формирует сигналы на подключение локальных регуляторов, которые, в свою очередь, формируют управляющие сигналы для исполнительных механизмов.

На рис. 3 представлена функциональная схема анализатора динамически ситуаций. Схема, по существу, отражает классификацию возмущающих воздействий для ТП абсорбционной осушки природного газа. На схеме приняты обозначения: гиз – измеряемые возмущения; гид – непосредственно неизмеряемые возмущения, но которые могут быть идентифицированы по результатам наблюдения процесса регулирования или получены по результатам, взятым из хранилища баз данных; гкл – возмущения, которые не имеют количественной оценки.

Информация от блоков возмущений поступает в блок оценивания ситуаций, в котором происходит обработка информации, принимается решение о текущей динамической ситуации и генерируется соответствующая оценка. Полученная оценка поступает в блок формирования сигнала подключения локального регулятора, «настроенного» на динамическую ситуацию.

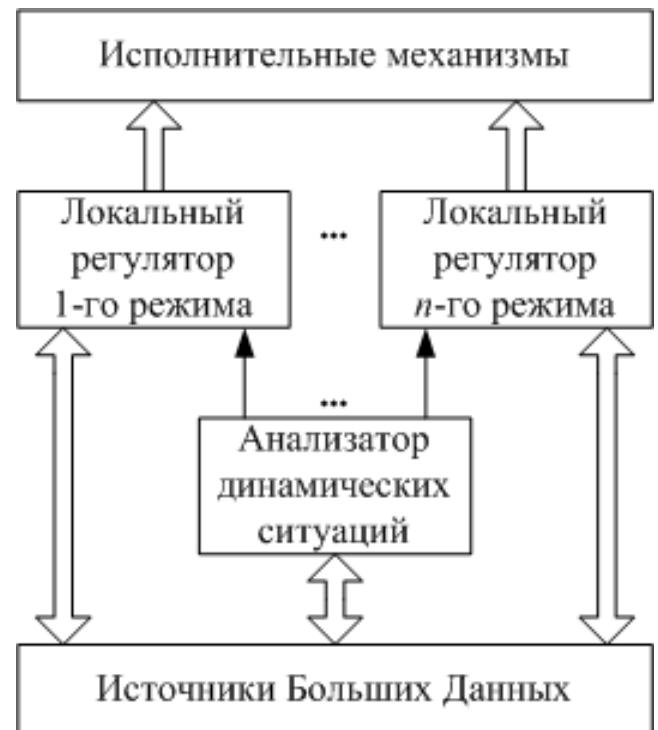


Рисунок 2 – Функциональная схема многорежимного регулятора

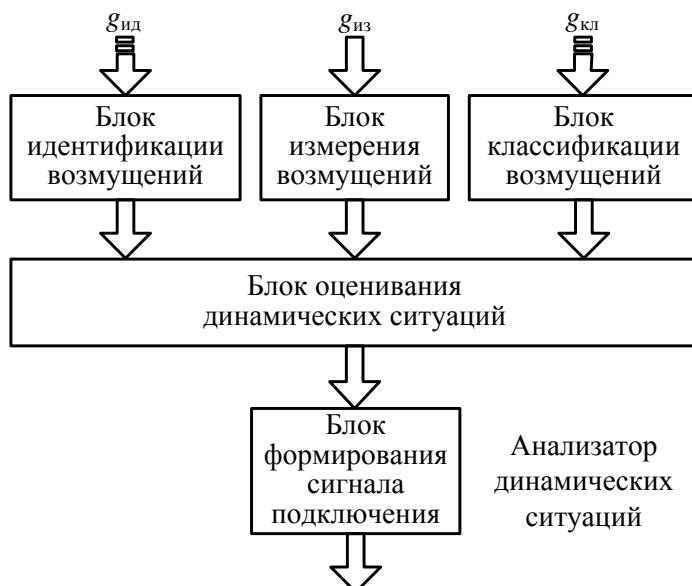


Рисунок 3 – Функциональная схема анализатора динамических ситуаций

Блоки, входящие в анализатор динамических ситуаций, реализуются как программные блоки. При реализации программного анализатора динамических ситуаций можно воспользоваться одной из платформ анализа Больших Данных, которая предполагает обработку информации, полученной из различных источников, в режиме РВ. Например, в случае управления процессами газопромысловой технологии информация от системы датчиков должна обрабатываться с целью выявления, классификации или прогнозирования возможных событий, а также формирования на основе этих данных управляющего воздействия на объект.

Отметим, что Большие Данные, поступающие от датчиков, могут лежать в основу не только процесса управления, но и диагностирования состояния объекта (норма, предаварийный режим, аварийный режим).

Заключение. Представлено состояние и развитие автоматизации объектов газовой отрасли. Предложена концепция управления сложными техническими объектами и ТП, основанная на платформе разработки Цифровых моделей (Цифровых двойников). В рамках данной концепции получены нелинейные математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов в абсорбере, испарителе и АВО. Отличительной особенностью представленных моделей является учтенная в них зависимость скорости газообразной фазы (природный газ, пар) от ряда факторов. Построение систем управления с учетом этих моделей базируется на принципе многорежимности, который заключается в том, что управляющее воздействие вырабатывается в зависимости от текущей динамической ситуации. Для формирования управляющих воздействий используются данные измерений, получаемые от информационно-измерительной системы ТП в режиме РВ, а также Большие Данные, накопленные за время эксплуатации комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оруджев С.А. Газовая промышленность по пути прогресса. М.: Недра, 1976.
2. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф., Схиртладзе А.Г. Интегрированные системы проектирования и управления. Структура и состав. М.: «Изд-во Машиностроение-1», 2006.
3. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: Профессия, 2009.
4. Анашкин А.С., Кадыров Э.Д., Харазов В.Г. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления. СПб.: П-2, 2004.
5. Автоматизация процессов газовой промышленности / М.А. Балавин, С.П. Продовиков, А.З. Шайхутдинов и др.; Под общ. ред. А.З. Шайхутдинова. СПб.: Наука, 2003.

6. Васильев Ю.Н. Автоматизированная система управления разработкой газовых месторождений. М.: Недра, 1987.
7. Ананенков А.Г., Ставкин Г.П., Талыбов Э.Г.о. АСУ ТП промыслов газоконденсатного месторождения Крайнего Севера. М.: Недра-Бизнесцентр, 1998.
8. Автоматизация технологических процессов добычи и подготовки нефти и газа / Е.Б. Андреев, А.И. Ключников, А.В. Кротов и др.; Под общ. ред. В.Е. Попадько. М.: Недра-Бизнесцентр, 2008.
9. Никоненко И.С. Создание систем автоматизированного управления в добывче газа. М.: Недра, 2001.
10. Еремин Н.А. Современная разработка месторождений нефти и газа. Умная скважина. Интеллектуальный промысел. Виртуальная компания. М.: Недра-Бизнесцентр, 2008.
11. Еремин Н.А. Управление разработкой интеллектуальных месторождений нефти и газа. В 2 кн. Кн. 1. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011.
12. Еремин Ал.Н., Еремин Ан.Н., Еремин Н.А. Управление разработкой интеллектуальных месторождений нефти и газа. В 2 кн. Кн.2. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012.
13. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. Таганрог: ТРТУ, М.: Энергоатомиздат, 1994.
14. Кулиев А. М., Алекперов Г. З., Тагиев В. Г. Технология и моделирование процессов подготовки природного газа. М.: Недра, 1978.
15. Кафаров В. В. Моделирование химических процессов. М.: Знание, 1968.
16. Тараненко Б. Ф., Герман В. Т. Автоматическое управление газопромысловыми объектами. М.: Недра, 1976.
17. Протодьяконов И. О., Муратов О. В., Евлампиев И. И. Динамика процессов химической технологии: учеб. пособие для вузов. Л.: Химия, 1984.
18. Майер-Шенбергер В., Кукье К. Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014.
19. Селезнев К. Проблемы анализа больших данных // Открытые системы. СУБД, 2012. №7. С. 25–29.
20. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.
21. Филимонов Н. Б. Концепция многорежимного регулирования // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: Межвуз. сб. науч. тр. Новосибирск: НЭТИ, 1988. С. 88–92.

Абрамкин Сергей Евгеньевич, Душин Сергей Евгеньевич,
Черкасова Валерия Андреевна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В БЛОКЕ ОГНЕВОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ДИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ

Аннотация. Цель – уточнение и исследование математических моделей теплообменных процессов в испарителе ректификационной колонны. Решаемые задачи: построение и анализ поведения динамических моделей теплообменных процессов в блоке огневой регенерации диэтиленгликоля с учетом теплового источника; компьютерное моделирование процессов в системе управления. Результаты: исследованы модели пространственно-распределенных управляемых теплообменных процессов в испарителе, разработана компьютерная модель в программной среде MATLAB/Simulink.

Ключевые слова: теплообмен, огневая регенерация, диэтиленгликоль, пространственно-распределенная модель, топливный газ, источник теплоты, контур регулирования.

Annotation. The goal is refining and studying mathematical models of heat exchange processes in the evaporator of the distillation column. Solved problems: the construction and analysis of the behavior of dynamic models of heat exchange processes in the block of fire regeneration of diethylene glycol taking into account the heat source; computer simulation of processes in the control system. Results: models of spatially-distributed controlled heat-exchange processes in the evaporator are investigated, a computer model is developed in the MATLAB / Simulink software environment.

Keywords: heat exchange, fire regeneration, diethylene glycol, spacer-distributed model, fuel gas, heat source, control loop.

Введение

В российской газовой промышленности наблюдается тенденция к увеличению поставок продукции в связи с расширением потребительского рынка, реконструкцией действующих промыслов и модернизацией производственного оборудования, связанного с добычей и переработкой природного газа. С целью повышения конкурентоспособности отрасли и сокращения расходов возникает насущная проблема перехода на цифровое производство. Улучшение автоматизации технологических процессов (ТП) достигается внедрением современного «умного» оборудования, в конечном итоге, обеспечивающего повышение качества производимого продукта.

Дальнейшее повышение эффективности автоматизированных систем управления (АСУ) ТП невозможно без построения адекватных математических моделей (ММ), учитывающих физико-химические особенности процессов, и проведения вычислительных, полунатурных и натурных экспериментов. На пути создания кибер-физических производственных систем стоит проблема управления реальными технологическими объектами в режимах реального времени с использованием компьютерных моделей (так называемых «цифровых двойников»).

Кафедра автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ» давно занимается проблемами моделирования и управления в различных отраслях промышленности. Нефтяная и газовая отрасль в исследованиях кафедры представлена работами В.А. Олейникова [1], в которых рассматривались проблемы математического моделирования и синтеза оптимальных управлений для технологических объектов на основе нелинейных динамических моделей. С 2007 г. активно проводятся исследования в области абсорбционной (гликольной) подготовки природного газа [2]–[6]. Разработанные модели рекомендуются к применению на газовых промыслах Крайнего Севера.

Проведенное исследование направлено на уточнение модели теплообменных процессов в блоке огневой регенерации диэтиленгликоля, представленной в [2]. В существующую ММ был добавлен нелинейный источник тепла.

Блок огневой регенерации предназначен для восстановления необходимой концентрации абсорбента с целью повторного использования в абсорбере.

Основная функция испарителя состоит в передаче тепла от стенок жаровых труб к потоку жидкой фазы. В топочную трубу испарителя поступает пламя от газовой горелки, нагревающее пространство в трубе. В результате нагрева образуются дымовые газы, впоследствии поступающие в жаровые трубы и выводящиеся через дымовую трубу в атмосферу. Процесс теплопереноса в блоке огневой регенерации диэтиленгликоля отображен на рис. 1.

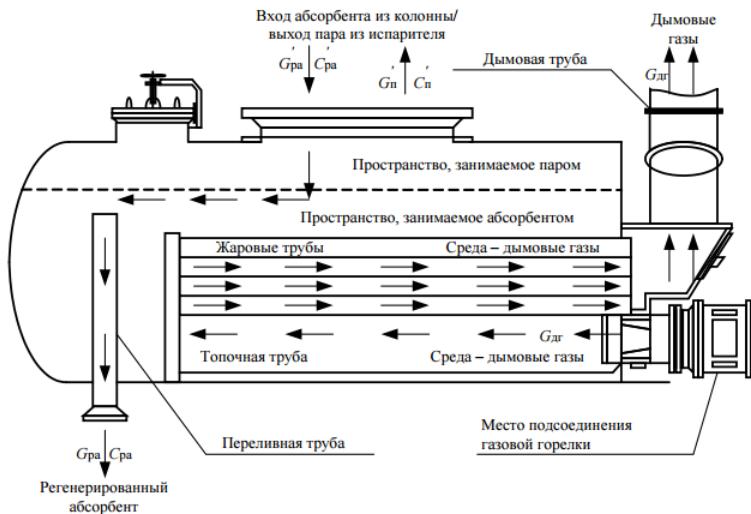


Рисунок 1 – Схема движения потоков в испарителе

В пространство между трубами испарителя стекает поток G'_{pa} – частично регенирированный абсорбент, из ректификационной колонны. Поток G_{dg} – дымовые газы, нагревает стенки жаровых труб. При передаче тепла от стенок жаровых труб происходит нагрев потока G'_{pa} до заданной температуры, в результате которого осуществляется конечное выпаривание паров воды из потока. Поскольку потоки G'_{pa} и G_{dg} движутся в противоположных направлениях, в установке используется противоточная схема теплообмена.

Горение – сложный физико-химический процесс превращения исходных веществ в продукты сгорания в ходе экзотермических реакций, сопровождающийся интенсивным выделением тепла. В издании по математическому моделированию Самарского А.А. [7] и в теории самоорганизации Курдюмова С.П. [8] рассматриваются процессы горения, с помощью аналитических методов. Особое внимание уделено структуре процесса теплопередачи, однако, все моделирования приводят к режимам с обострением, что наглядно показывает нелинейность процессов горения, но позволяет понять структуру пламени и дает возможность отследить неожиданные эффекты: влияние начальных профилей температуры, появление диссипативной структуры, забывание начальных данных.

В результате анализа физических основ процесса горения в исследовании было использовано уравнение нестационарного теплообмена [9] с учетом внутренних источников теплоты:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial\theta}{\partial t} + v_x \frac{\partial\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial\theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial\theta}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p\rho} \nabla^2 \theta + Q_p \omega \quad (1)$$

где $d\theta/dt$ – соответствует локальному накоплению теплоты во времени пространством объемом dV за счет изменения температуры;

$v_x(\partial\theta/\partial x) + v_y(\partial\theta/\partial y) + v_z(\partial\theta/\partial z)$ – отвечает накоплению теплоты в пространстве за счет конвекции;

$(\lambda/(c_p\rho)) \nabla^2 \theta$ – выражает перенос теплоты кондукцией (теплопроводностью);

$$\omega = K_0 C^m e^{-E/(R\theta)}$$

– интенсивность источника теплоты;

$$\alpha = \lambda / (c\rho p) – \text{коэффициент температуропроводности, м}^2/\text{с};$$

$$Q_p – \text{тепловой эффект реакции, при постоянном давлении, кДж/моль;}$$

u_x, u_y, u_z – компоненты вектора скорости u ;

$$K(\theta) = K_0 e^{-E/(R\theta)}$$

– константа скорости реакции, зависящая от температуры;

$$E – \text{энергия активации, кДж/кмоль;}$$

$$K_0 – \text{постоянная, 1/с.}$$

При построении динамической ММ теплообменного процесса в подсистеме «Испаритель» введены следующие допущения:

– продольное перемешивание в каждом из теплоносителей отсутствует, т. е. физические среды в испарителе движутся в режиме идеального вытеснения;

– поперечное перемешивание в потоках теплоносителей считается идеальным, следовательно, модель может быть одномерной, и распределение температуры будет происходить только по длине испарителя;

– термическое сопротивление стенок испарителя сравнительно мало, следовательно, температура стенки $\theta_{ст}(x,t)$, разделяющей теплоносители, постоянна по толщине стенки.

Так как горелка подведена к испарителю в месте образования дымовых газов, источник теплоты учитывается только в уравнении, описывающем теплопередачу для дымовых газов. При этом описание источника теплого потока выражается через константу скорости реакции.

С учетом принятых допущений пространственно-распределенная модель, характеризующая нестационарный теплообмен, включающая разделительную стенку между теплоносителями, и источник тепла будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{дг}}{\partial t} &= -v_{дг} \frac{\partial \theta_{дг}}{\partial x} - R_{дг} (\theta_{дг} - \theta_{ст}) + Q_p K_0 C^m e^{-\frac{E_a}{R\theta_{тп}}}; \\ \frac{\partial \theta_{ж}}{\partial t} &= v_{ж} \frac{\partial \theta_{ж}}{\partial x} + R_{ж} (\theta_{ст} - \theta_{ж}); \\ \frac{\partial \theta_{ст}}{\partial t} &= R_{дгст} (\theta_{дг} - \theta_{ст}) - R_{жст} (\theta_{ст} - \theta_{ж}). \end{aligned} \quad (2)$$

Границные условия:

$$\theta_{дг}(x, t)|_{x=l} = \theta_{дг}^{вых}(t), \theta_{дг}(x, t)|_{x=0} = \theta_{дг}^{вых}(t);$$

$$\theta_{ж}(x, t)|_{x=0} = \theta_{ж}^{вых}(t), \theta_{ж}(x, t)|_{x=l} = \theta_{ж}^{вых}(t).$$

Начальные распределения температур теплоносителей задаются соотношениями:

$$\theta_{дг0}(x) = \theta_{тп}(x) = \theta_{дг}(x, t)|_{t=0}, \theta_{ж0}(x) = \theta_{ж}(x, t)|_{t=0}.$$

Для получения компьютерной модели система дифференциальных уравнений в частных производных (2) заменяется обыкновенными дифференциальными уравнениями. Учитывая введенное допущение о равенстве температуры топочных газов от горелки и температуры дымовых газов, окончательно модель подсистемы «Испаритель» записывается как:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{дг_i}}{dt} &= -\left(\frac{v_{дг}}{h} + R_{дг}\right)\theta_{дг_i} + R_{дг}\theta_{ст_i} + \frac{v_{дг}}{h}\theta_{дг_{i-1}} + R_{тп}e^{-\frac{E_a}{R\theta_{дг_{i-1}}}}; \\ \frac{d\theta_{ж_i}}{dt} &= -\left(\frac{v_{ж}}{h} + R_{ж}\right)\theta_{ж_i} + R_{ж}\theta_{ст_i} + \frac{v_{ж}}{h}\theta_{ж_{i-1}}; \\ \frac{d\theta_{ст_i}}{dt} &= R_{дгст} (\theta_{дг_i} - \theta_{ст_i}) - R_{жст} (\theta_{ст_i} - \theta_{ж_i}). \end{aligned} \quad (3)$$

Так как в испарителе четыре ряда жаровых труб, то дискретизация происходит в четырех точках.

Исследование процессов выполнялось в компьютерной среде MATLAB/Simulink. Интегрирование производилось явным методом Рунге-Кутта 2-го и 3-го порядков в модификации *Bogacki-Shampine* с фиксированным шагом.

При резком снижении температуры регенерированного абсорбента на 3 градуса Кельвина наблюдаются изменения температурных режимов потоков, графики которых представлены на рис. 2.

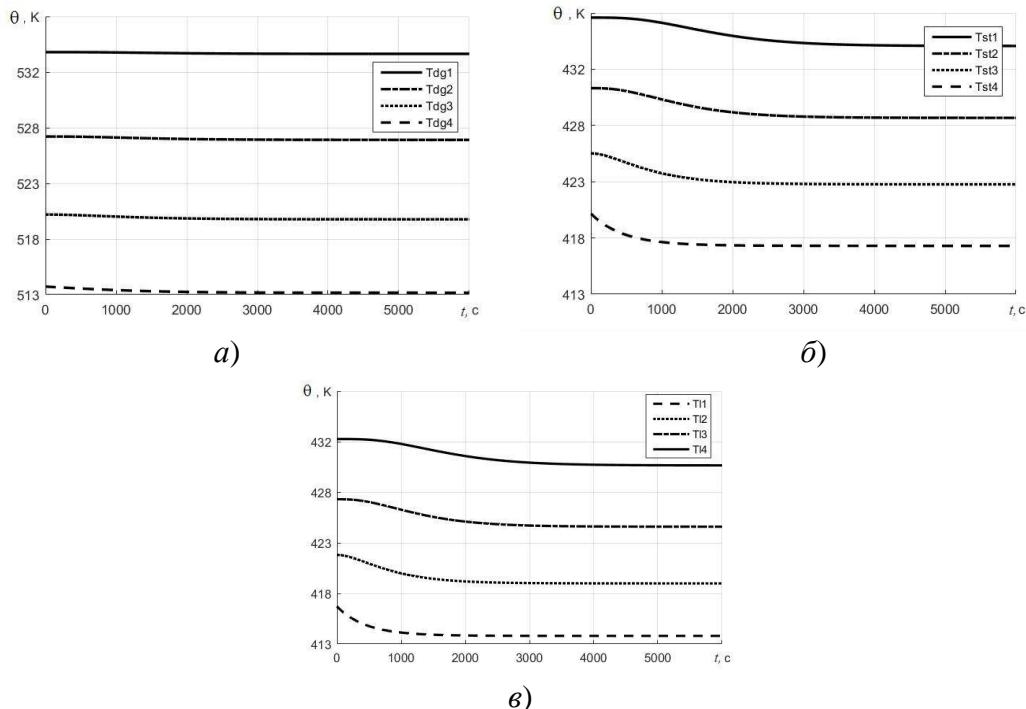


Рисунок 2 – Графики переходных процессов:

a) для потока дымовых газов; *б)* для стенки; *в)* для потока абсорбента

Как следует из рис. 2, процессы монотонно убывающие, причем распределение температуры дымовых газов практически не меняется. По результатам анализа прослеживается снижение температуры абсорбента с 433 К до недопустимого значения 430,7 К, что не соответствует технологическим нормам. Температура частично регенерированного диэтиленгликоля должна отвечать значению 412 К, чтобы обеспечивалась нужная концентрация абсорбента.

Концентрация регенерированного диэтиленгликоля существенно влияет на качество осушки природного газа. Поэтому важнейшая задача в подготовке природного газа заключается в стабилизации концентрации регенерированного диэтиленгликоля. Постоянство концентрации абсорбента возможно при поддержании стабильного значения температуры диэтиленгликоля.

Система регулирования температурой абсорбента в испарителе строится таким образом, что управляющее воздействие осуществляется за счет изменения расхода подачи топливных газов из горелки. Возмущающим воздействием является изменение температуры абсорбента, поступающего из колонны регенерации.

Для того, чтобы определить соотношение длины факела и температуры топочных газов, можно воспользоваться формулой В.А. Михельсона [10]:

$$\frac{l}{d} = 0,5 \sqrt{\left(\frac{v_h}{v}\right)^2 - 1}, \quad (4)$$

где l – длина кинетического факела, м;

d – внутренний диаметр сопла горелки, м;

v_n – начальная средняя по сечению скорость истечения газа, м/с;
 v – скорость распространения пламени, м/с.

Температура внутреннего кинетического факела зависит от теплоемкости продуктов горения, которая определяется выражением [11]:

$$\theta_r = \frac{Q}{VC_{\text{пр.г.}}} + \theta_n, \quad (5)$$

где θ_r – теоретическая температура горения, К;

Q – теплотворная способность топлива, Дж/м3;

θ_n – начальная температура воздуха, К;

$C_{\text{пр.г.}}$ – объемная теплоемкость продуктов горения, Дж/м3К;

V – объем продуктов горения, образующихся при горении 1 кг топлива, м3/м3.

Объемная теплоемкость продуктов горения определяется из эмпирической формулы [12]:

$$C_{\text{пр.г.}} = (1,75 \div 2,2) \frac{q}{v}, \quad (6)$$

где $(1,75 \dots 2,2)$ – коэффициент, находящийся в зависимости от значения избытка воздуха;

q – тепловая плотность горения, Дж/м2с.

Так как согласно техническим характеристикам горелки избыток воздуха находится в пределах от 1,05 до 1,15, при подстановке формулы (6) в (5):

$$\theta_r = \frac{Qv}{1,9Vq} + \theta_n. \quad (7)$$

Из соотношения (8) выражается скорость распространения пламени:

$$v = \frac{1,9Vq(\theta_r - \theta_n)}{Q}. \quad (8)$$

С учетом того, что отношение $(v_n/v)^2 \gg 1$, формула (4) приобретает вид:

$$\frac{l}{d} = 0,5 \frac{v_n}{v}. \quad (9)$$

Тогда при подстановке скорости распространения пламени (8) в формулу (9) запишем зависимость длины факела от температуры горения:

$$l = 0,5 \frac{v_n Q d}{1,9Vq(\theta_r - \theta_n)}. \quad (10)$$

Таким образом, как следует из соотношения (10), длина факела существенно зависит от скорости истечения топливного газа; при увеличении температуры горения длина факела будет уменьшаться.

Функциональная схема системы регулирования температурой абсорбента в испарителе приведена на рис. 3. На схеме приняты следующие обозначения: Р – регулятор; Дв – серводвигатель; РО – регулирующий орган (заслонка); И – испаритель (объект управления); Д – датчик температуры; Э – энкодер; З – задатчик.

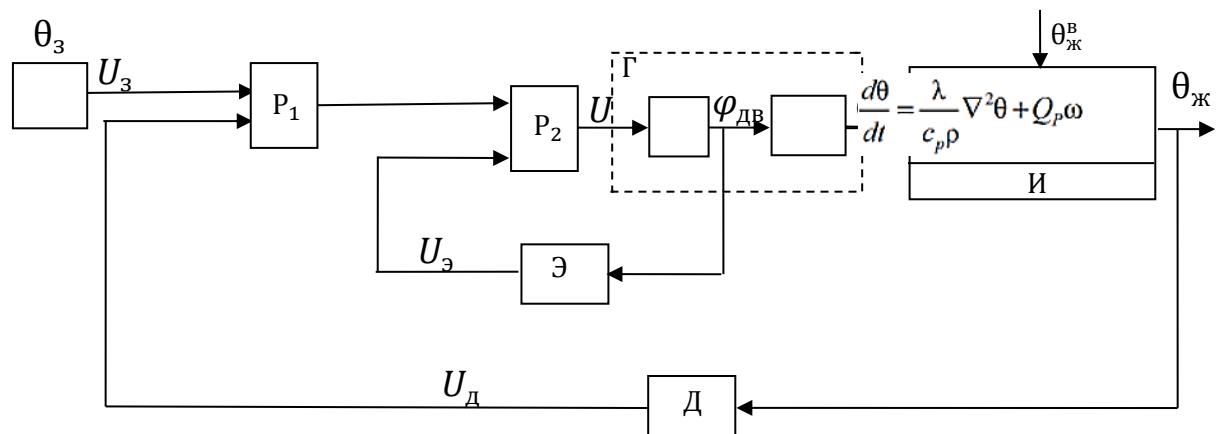


Рисунок 3 – Функциональная схема системы регулирования

На основе функциональной схемы была построена компьютерная модель системы регулирования в среде MATLAB/Simulink. Моделирование процессов в системе проводилось в предположении, что температура абсорбента на входе в испаритель уменьшилась на 7 К. Температурные профили процессов представлены на рис. 4.

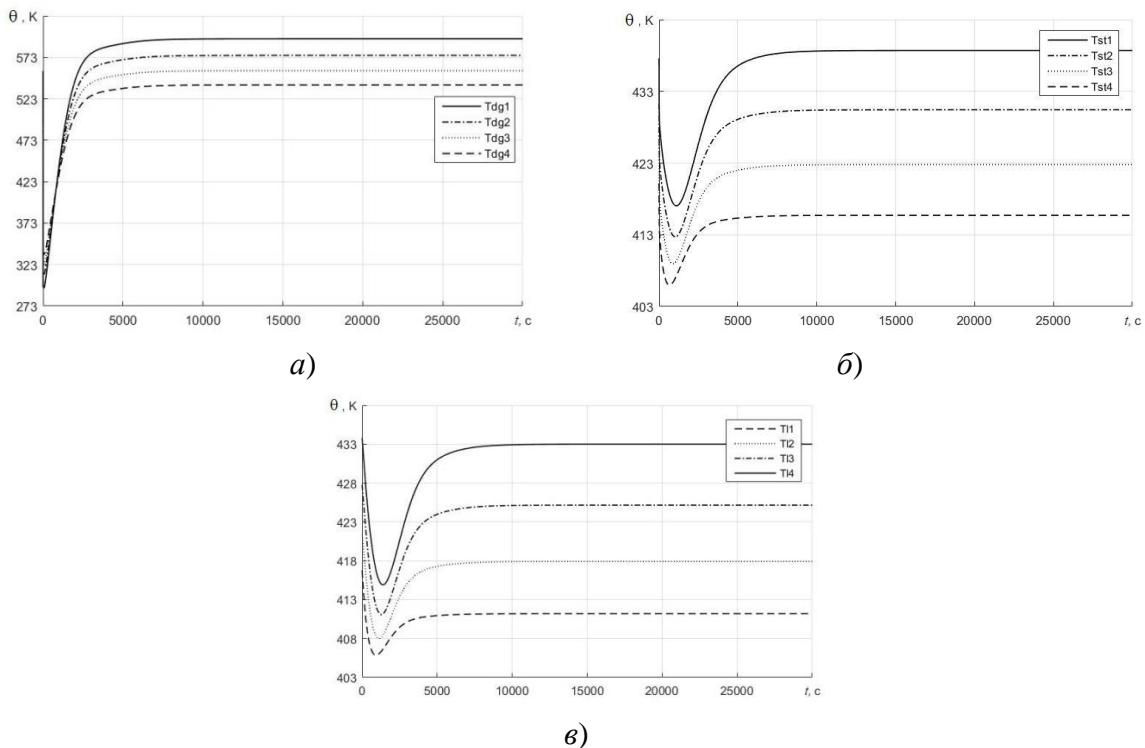


Рисунок 5 – Графики переходных процессов:

а) для потока дымовых газов; б) для стенки; в) для потока абсорбента

На данных графиках видно, что температура абсорбента на выходе из испарителя становится равной заданной температуре. Полученное время переходных процессов: 2,5 часа – для потока абсорбента, 1,8 – часа для потока дымовых газов, запас устойчивости системы по фазе равен 60 градусам для внешнего контура, 80 градусам – для внутреннего контура, запас устойчивости по амплитуде значительно лучше поставленного изначально в задаче регулирования: 47 дБ – внешний контур, ∞ дБ – внутренний контур. Разработанная система стабильна и соответствует требованиям производства.

Перспективы развития исследования заключаются в получении уточненной модели испарителя, с учетом нелинейно-изменяющейся концентрации газа; разработке контура управления

подачей топливного газа и воздуха; разработка контура управления на основе длины факела горелки.

Результаты:

1. В ходе исследования проанализированы особенности уравнения теплопереноса с учетом источника теплоты, выраженного через закон Аррениуса.
2. Построена математическая модель на основе предложенных допущений.
3. Построена компьютерная модель в среде MATLAB/Simulink, модель не является самокорректирующейся. Для получения обусловленного технологическим процессом значения температуры диэтиленгликоля необходима система автоматического управления.

Разработана система управляющего контура, применено компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink, выявлены колебания в начале регулирования температуры абсорбента, заданная температура поддерживается системой управления с необходимой точностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олейников В. А. Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. – Л.: Недра, 1982. – 216 с.
2. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Динамические модели управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа // Приоритетные направления развития Уренгойского комплекса: Сб. научн. тр./ ООО «Газпром добыча Уренгой». – М.: Издательский дом Недра, 2013. С. 242–253.
3. Абрамкин С. Е. Анализ технологического процесса абсорбционной осушки газа как объекта управления // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2007. № 3. С. 24–31.
4. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
5. Абрамкин С. Е., Душин С. Е. Разработка математической модели технологического комплекса «Абсорбция – Десорбция» // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 1. С. 29–33.
6. Абрамкин С. Е., Душин С. Е., Кузьмин Н. Н. Математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов в технологическом комплексе систем «абсорбция- десорбция» // Изв. ЮФУ. Технические науки. Системный синтез и прикладная синергетика. 2011. № 6. С. 255–264.
7. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры/А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 320 с.
8. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика – теория самоорганизации. Идеи, методы, перспективы. – М.: Знание, 1983. – 64 с. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Математика, кибернетика»; №2)
9. Кудинов А.А. Краткий курс теории горения органических топлив: Учеб пособ./А.А. Кудинов. – Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2004. – 210 с.
10. Михельсон В. А. //Собр. соч. М. – 1930 – 399 с.
11. Справочник по автономному и резервному газоснабжению/ ООО "Газтехника" – СПб., 2015 – 362 с.
12. Норкин Н. Н. Факельный процесс горения газа в условиях свободной турбулентной струи //Изв. Томского политехнического института. – 1953. – Т. 77. – С. 19-27.

Брикова Ольга Игоревна, Грудяева Елизавета Камаловна,
Душин Сергей Евгеньевич

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА УПРАВЛЯЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Аннотация. Существующие модели биоочистки не учитывают влияния внешних факторов, поэтому цель работы – исследование влияния температуры и pH на процессы биологической очистки сточных вод. Решаемые задачи заключаются в анализе влияния температуры и водородного показателя на поведение базовых моделей Моно, Герберта, Холдейна и Кенейла. В результате исследований найдены оптимальные условия для развития биоценоза активного ила, которые могут быть положены в основу создания математических моделей управляемых процессов нитрификации и денитрификации.

Ключевые слова: биологическая очистка, сточные воды, активный ил, модель Моно, модель Герберта, модель Холдейна, модель Кенейла, температура, pH.

Annotation. The existing models of biocleaning do not consider influence of external factors on processes. The research of temperature effect and pH a surrounding medium on processes of biological cleaning allows to define optimum conditions for development of a biocenosis of the activated sludge. The received results should be considered by consideration of the models of a nitrification and denitrification.

Keywords: activated sludge, temperature, pH, model of Mono, model of Haldane, model of Gerbert, model of Canale, biocleaning.

Введение

Метод биологической очистки активным илом (АИ) относится к числу наиболее перспективных и эффективных. В основе данного метода лежит способность микроорганизмов АИ использовать субстрат в качестве источника питания. В настоящее время известен целый ряд математических моделей (ММ) биологической очистки сточных вод с использованием АИ [1–5] различной степени сложности и адекватности. Среди них выделяются базовые модели, доступные для аналитических исследований с целью выявления основных свойств и закономерностей, присущих биохимическим процессам очистки. К ним относятся нелинейные модели 2-го и 3-го порядков. Недостаток известных базовых моделей состоит в том, что влияние внешних факторов (например, температуры и pH окружающей среды) в них не учитывается.

Влияние температуры и pH на скорость роста микроорганизмов

Скорость роста микроорганизмов описывается уравнением Моно [1]:

$$\mu = \mu_m C / (C + K_c), \quad (1)$$

где C_c — концентрация субстрата; K_c — константа полунасыщения; μ_m — максимальная удельная скорость роста.

Как показали исследования [2–4], зависимость скорости роста биологического процесса μ_m от температуры Θ описывается уравнением Вант-Гоффа:

$$\mu_m(\Theta) = \mu_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(\Theta-20)}, \quad (2)$$

где $\mu_{\max}(20^\circ\text{C})$ — максимальная удельная скорость роста биомассы ила при температуре 20°C ; γ — температурный коэффициент.

Кинетика зависимости скорости роста микроорганизмов от pH описывается уравнением [2–3]:

$$\mu_m(pH) = \frac{\mu_m(\text{опт.} pH)K_{pH}}{K_{pH} + 10^{(\text{опт.} pH - pH)} - 1}, \quad (3)$$

где K_{pH} – pH -константа; $\text{опт.} pH$ – значение pH благоприятной среде для развития АИ.

Исследование влияния температурного фактора в модели Моно

Модель Моно для аэротенка-смесителя с учетом влияния температуры окружающей среды характеризуется следующей системой дифференциальных уравнений (ДУ):

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{C_i}{T} + \frac{\mu_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(\theta-20)} C_c C_i}{K_c + C_c}, \quad (4)$$

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{bx}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(\theta-20)} C_c C_i}{Y(K_c + C_c)}, \quad (5)$$

где C_c, C_i — концентрации субстрата и ила; C_c^{bx} — входная концентрация субстрата; $Y = |C_i / C_c|$ — коэффициент трансформации субстрата в ил; K_c — константа полунасыщения; T — период аэрации. При анализе поведения модели принимаются следующие допущения: влияние водородного показателя pH не учитывается; константы K_c, Y не зависят от температуры; биомасса в реакторе полностью перемешивается (режим полного перемешивания).

Исследование проводится при 4-х температурных режимах, приведенных в табл. 1. Температурный режим изменяется путем постепенного увеличения и снижения температуры до заданных значений.

Таблица 1 – Исследуемые температурные режимы

№ температурного режима	Возрастание температуры θ	Убывание температуры θ
1	От 10°C до 20°C	До 10°C
2	От 10°C до 30°C	До 10°C
3	От 20°C до 30°C	До 20°C
4	От 20°C до 40°C	До 20°C

На всех режимах снижение температуры θ происходит при $t_1 = 20\text{ ч}$ или $t_2 = 30\text{ ч}$

Моделирование процессов в системе осуществляется при нулевой начальной концентрации субстрата; концентрация иловой массы является результатом начальной сухой загрузки. При моделировании принимаются следующие значения параметров: $Y = 0,55$; $\mu_{\max}(20^\circ\text{C}) = 0,69\text{ ч}^{-1}$; $K_c = 29\text{ ч}^{-1}$; $Q^{\text{bx}} = 7\text{ м}^3/\text{ч}$; $V = 100\text{ м}^3$; $\gamma = 0,1$.

На рис. 1 и 2 приведены переходные процессы концентраций субстрата (C_c) и ила (C_i) при снижении температуры в момент времени $t_1 = 20\text{ ч}$ и $t_2 = 30\text{ ч}$ соответственно. Наиболее чувствителен к изменению температуры режим 1, поскольку имеет самую низкую температуру. Снижение температуры в более поздний момент времени t_2 позволяет биомассе АИ вырасти и тем самым обеспечить лучшую очистку.

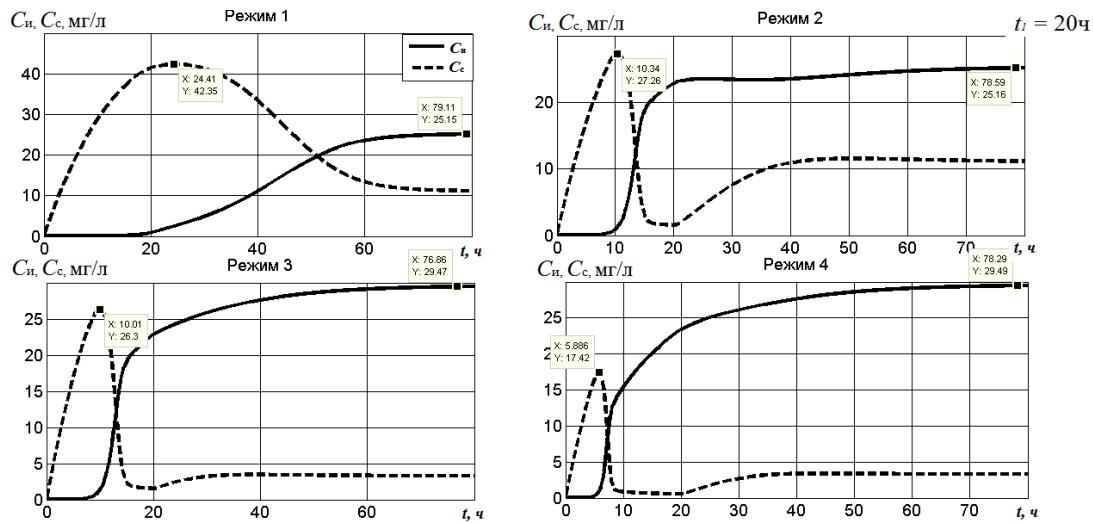


Рисунок 1 – Переходные процессы в модели Моно при различных температурных режимах при $t_1=20\text{ч}$

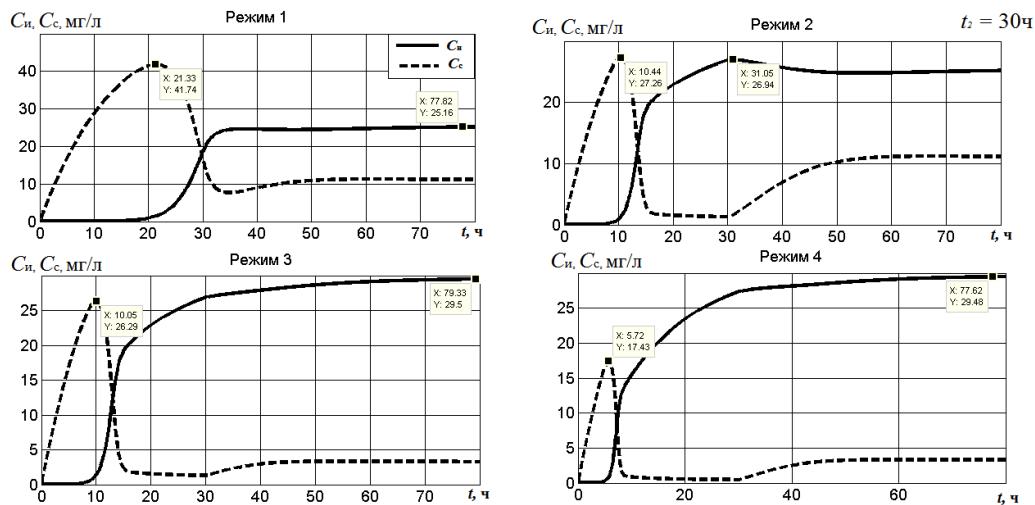


Рисунок 2 – Переходные процессы в модели Моно при различных температурных режимах при $t_2=30\text{ч}$

Повышение температуры способствуют развитию биоценоза АИ и снижает концентрацию C_c . При этом тенденция роста биомассы в случае более долгого поддержания высокой температуры сохраняется (на 6% больше), время установления процессов снижается на 16%.

Низкая температура снижает скорость ферментативных реакций, замедляет процессы окисления и флокулообразования, что неблагоприятно отражается на качестве очищенной воды. Высокая температура, как видно из графиков, способствует приросту биомассы ила, однако также приводит к неблагоприятным изменениям в его составе.

Исследование влияния температурного фактора в модели Герберта

Модель Герberта является модификацией модели Моно и с учетом температурного фактора система ДУ принимает следующий вид [4]:

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{C_i}{T} + \frac{\mu_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(0-20)}}{K_c + C_c} - bC_i, \quad (6)$$

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{bx}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(\theta-20)} C_c C_i}{Y(K_c + C_c)}, \quad (7)$$

где b – константа скорости самоокисления бактерий, описывает фазу отмирания микроорганизмов. Значения константы b составляют $0,02 - 0,03 \text{ ч}^{-1}$.

На рис. 3 и 4 представлены кривые переходных процессов C_i и C_c в моделях Моно и Герберта при снижении температуры в моменты времени $t_1 = 20 \text{ ч}$ и $t_2 = 30 \text{ ч}$ соответственно.

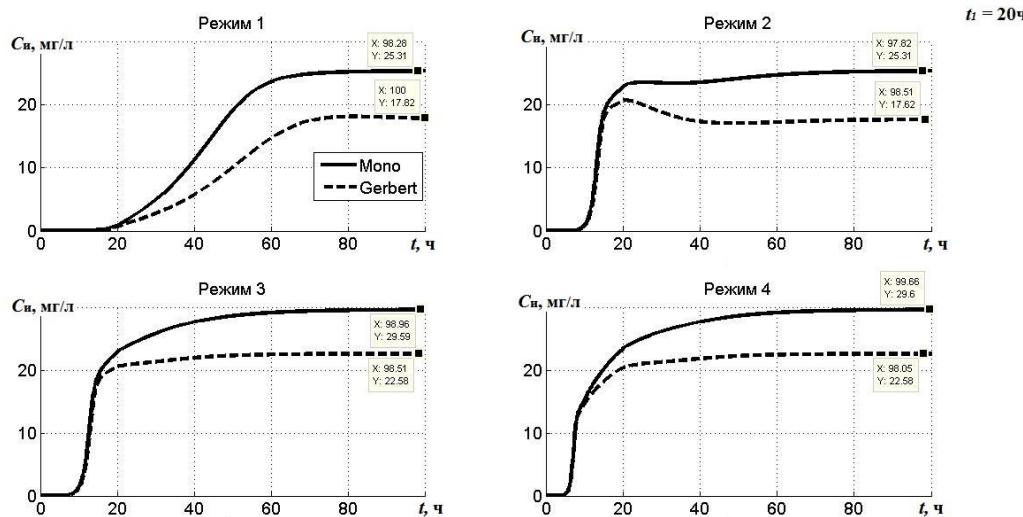


Рисунок 3 – Процессы изменения концентрации ила для модели Герберта и Моно при различных температурных режимах при $t_1=20\text{ч}$

В модели Герберта учитывается фаза отмирания бактерий, поэтому наибольшие отклонения C_i снизились в среднем на 25 % по сравнению с моделью Моно. Время установления отличается незначительно (не более 5%). Характер изменения кривых C_i во многом схож с аналогичными кривыми, полученными для модели Моно.

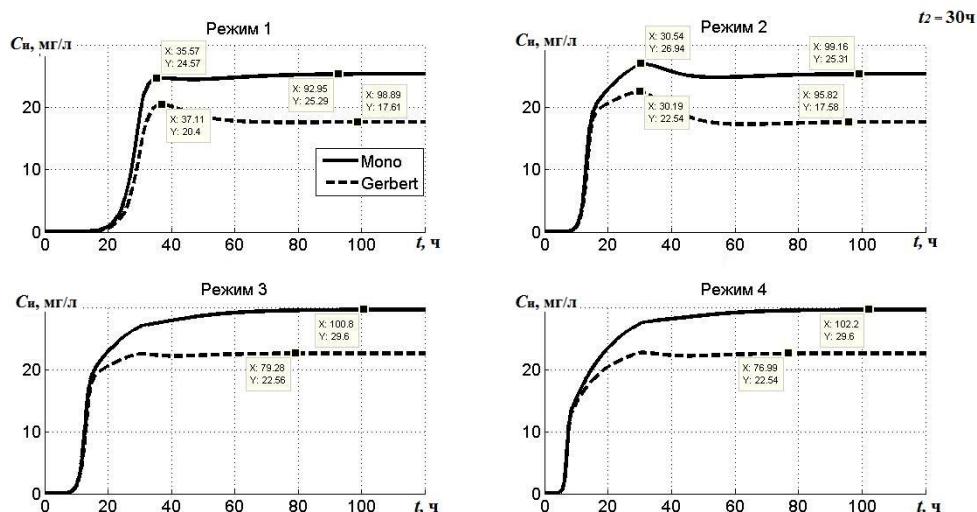


Рисунок 4 – Кривые изменения концентраций ила для модели Герберта и Моно при различных температурных режимах при $t_2=30\text{ч}$

На рис. 5 и 6 изображены графики переходных процессов концентраций C_c для моделей Моно и Герберта на различных температурных режимах для моментов снижения температуры $t_1 = 20\text{ч}$ и $t_2 = 30\text{ч}$ соответственно.

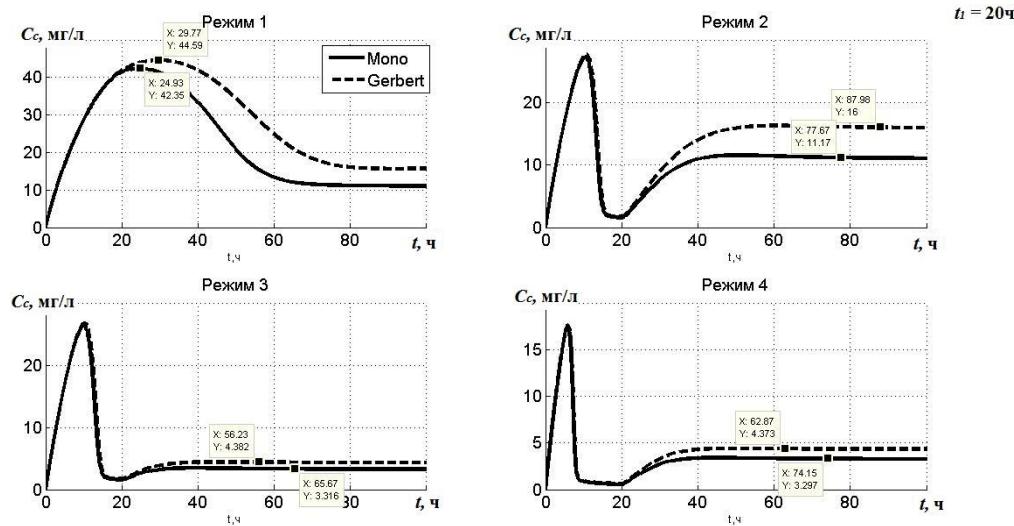


Рисунок 5 – Кривые изменения C_c для модели Герберта и Моно при различных температурных режимах при $t_1=20\text{ч}$

Наибольшие отклонения концентрации C_c в модели Герберта отличаются незначительно (не более 3 %) по сравнению с моделью Моно. Однако установившиеся значения C_c в модели Герберта выше.

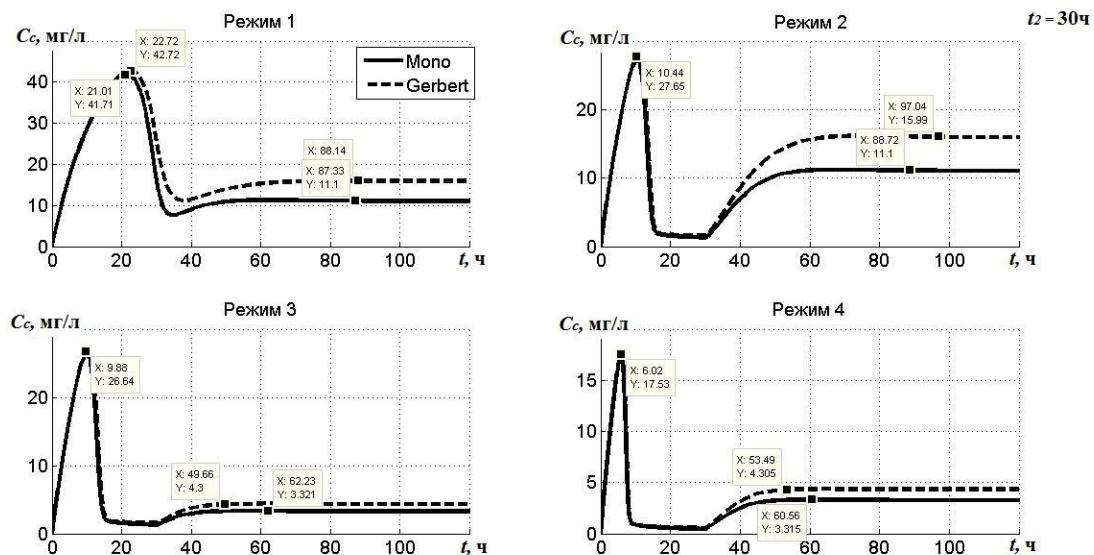


Рисунок 6 – Кривые изменения C_c для модели Герберта и Моно при различных температурных режимах при $t_2=30\text{ч}$

При температурном режиме 2 наблюдается наибольшее расхождение (от 12 до 15 %). При использовании высокотемпературных режимов 3 и 4 кривые почти идентичны (расхождения составляют не более 5 %).

Результаты, полученные при анализе модели Герберта подтверждают ранее сделанные выводы. Увеличение температурного режима приводит к росту численности популяции АИ.

Исследование влияния температурного фактора в модели Холдейна

Модель Холдейна характеризует кинетику биопроцессов с учетом ингибирующих свойств субстрата [5] и в условиях изменения температуры среды описывается системой ДУ:

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{C_i}{T} + \frac{\mu_{\max}(20^{\circ}\text{C}) \exp^{\gamma(0-20)} C_c C_i}{K_c + C_c + C_c^2 / K_i},$$

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{bx}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}(20^{\circ}\text{C}) \exp^{\gamma(0-20)} C_c C_i}{Y(K_c + C_c + C_c^2 / K_i)},$$

где K_i — константа ингибирования, равная $10K_c$.

На рис. 7 и 8 приведены процессы C_c и C_i при снижении температуры в момент времени $t_1 = 20\text{ч}$ и $t_2 = 30\text{ч}$ соответственно.

Максимальные значения C_i , полученные при использовании модели Холдейна, на 12% выше, чем в модели Моно при высокотемпературных режимах 3 и 4. Благоприятная среда в этом случае нейтрализует ингибирующее воздействие субстрата. Время установления для концентрации C_i увеличилось на 18% по сравнению с моделью Моно.

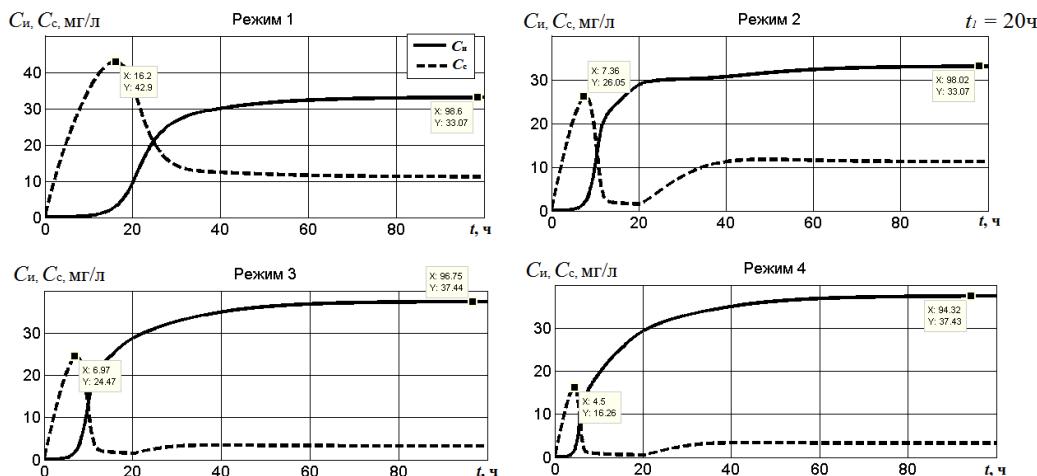


Рисунок 7 – Переходные процессы для модели Холдейна при различных температурных режимах при $t_1=30\text{ч}$

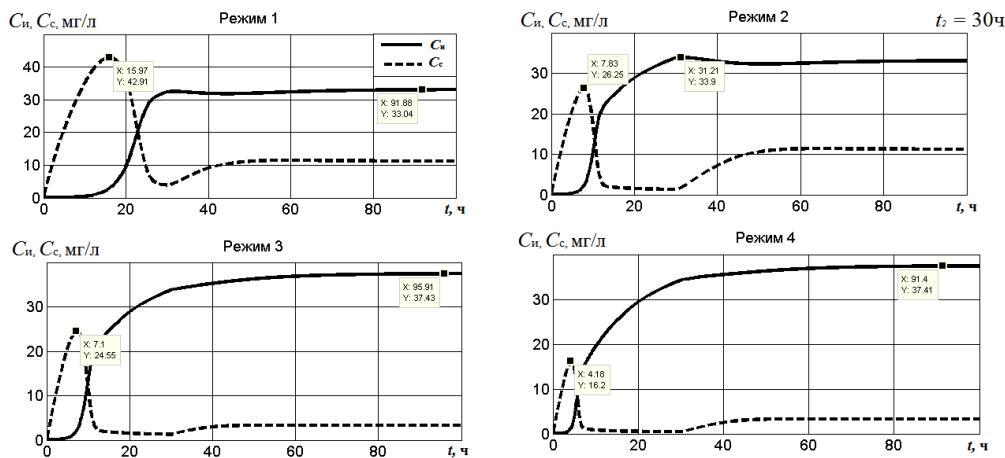


Рисунок 8 – Переходные процессы для модели Холдейна при различных температурных режимах при $t_2=30\text{ч}$

Наибольшие значения C_c отличаются незначительно (от 1 до 3%). При температурных режимах 1 и 2 время установления C_c уменьшается в среднем на 42% по сравнению с результатами, полученными в модели Моно. Повышение температуры способствует увеличению скорости прироста биомассы ила и уменьшению концентрации C_c (в среднем в 1,5 раза).

Исследование влияния температурного фактора в модели Кенейла

Модель Кенейла описывает процесс рост АИ, состоящего из бактерий и простейших, в условиях поглощения субстрата.

При составлении модели Кенейла были приняты следующие допущения: субстрат подается в биореактор непрерывно; АИ – совокупность чистых культур бактерий и простейших; изменение температуры осуществляется плавно в заданном диапазоне; влияние температуры на скорость подачи кислорода и эффект насыщения простейших не учитывается; процесс отмирания бактерий и простейших не учитывается; процесс рециркуляции в реакторе не учитывается.

Модель Кенейла, рассматривающая отношения субстрата и АИ как «хищник – жертва» [6], при изменении температурного режима представляется следующей системой ДУ:

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{bx}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(0-20)} C_c C_\delta}{Y(K_{C_c} + C_c)}, \quad (8)$$

$$\frac{dC_\delta}{dt} = -\frac{C_\delta}{T} + \frac{\mu_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(0-20)} C_c C_\delta}{K_C + C_c} - \frac{f_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(0-20)} C_n C_\delta}{g(K_\delta + C_\delta)}, \quad (9)$$

$$\frac{dC_n}{dt} = -\frac{C_n}{T} - \frac{f_{\max}(20^\circ\text{C}) \exp^{\gamma(0-20)} C_n C_\delta}{g(K_\delta + C_\delta)}, \quad (10)$$

Моделирование процессов проводится для принятых ранее допущений, введенных температурных режимах и значениях параметров: $\mu_{\max}(20^\circ\text{C}) = 0,49$; $f_{\max}(20^\circ\text{C}) = 0,15$; $Y = 0,55$; $K_c = 29$; $K_\delta = 8$; $T = 15$; $g = 0,15$; $\gamma = 0,1$.

На рис. 9 и 10 приведены графики переходных процессов концентраций субстрата (C_c), бактерий (C_δ) и простейших (C_n) при уменьшении температуры в момент времени $t_1 = 20\text{ч}$ и $t_2 = 30\text{ч}$ соответственно.

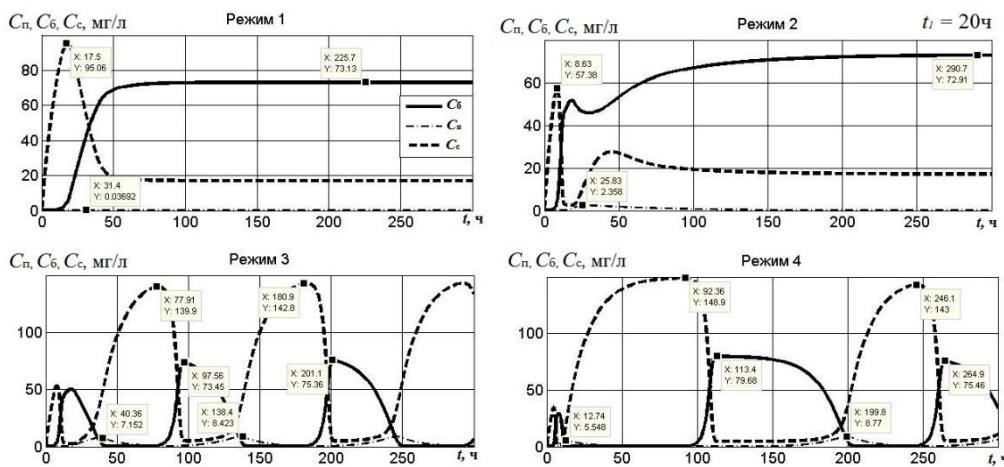


Рисунок 9 – Переходные процессы для модели Кенейла при различных температурных режимах при $t_1=20\text{ч}$

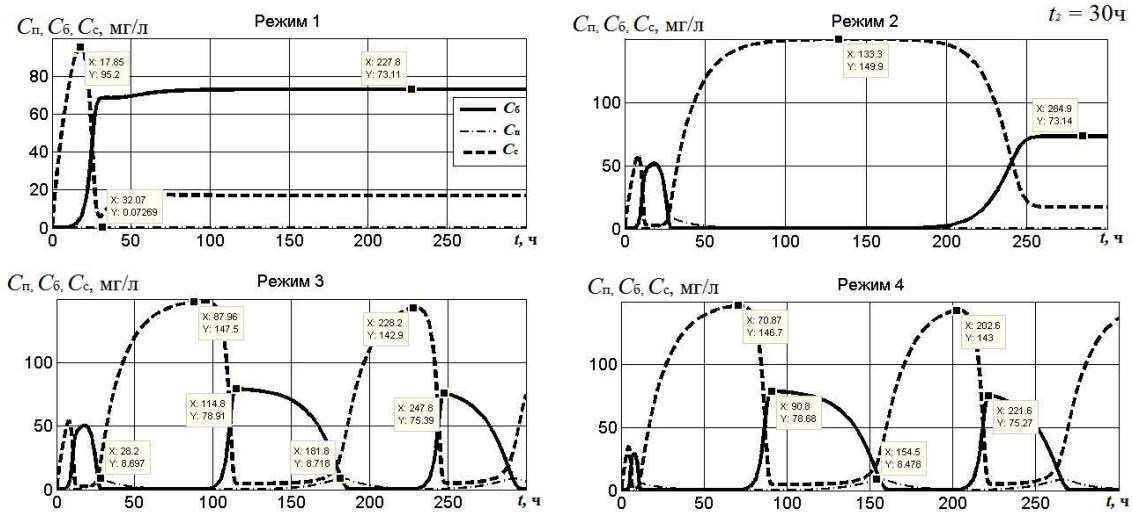


Рисунок 10 – Переходные процессы в модели Кенейла при различных температурных режимах при $t_2=30\text{ч}$

Негативное влияние повышения температуры особенно заметно при температурных режимах 3 и 4. В этих режимах процессы носят колебательный характер, что соответствует поведению модели «хищник — жертва», причем с повышением температуры период колебаний уменьшается. Увеличение длительности процесса до момента снижения температуры при температурных режимах 3, 4 способствовало снижению наибольших отклонений концентраций C_6 в среднем на 23% по сравнению со значениями при $t_2=20\text{ч}$.

Увеличение длительности до момента снижения температуры негативно повлияло на процессы, протекающие при температурном режиме 2. Наибольшее отклонение C_c увеличилось на 62%, колебательность процессов повысилась, при этом наибольшее значение C_6 изменилось незначительно. Полученный результат объясняется продолжительной адаптацией ила к изменившимся условиям.

Увеличение длительности процесса не привело к чувствительным изменениям (не более 5%) только при использовании низкотемпературного режима 1. При данном режиме процессы носят монотонный характер.

Таким образом, можно сделать вывод, что при учете более сложного состава ила влияние температуры проявляется нелинейно. Слишком высокая температура приводит систему к модели «хищник-жертва», что не способствует повышению качества биоочистки. Наилучший уровень очистки был достигнут при использовании 1-го и 2-го режима, причем особенностью 2-го режима является его чувствительность ко времени снижения температуры.

Исследование влияния pH-фактора в модели Моно

Модель Моно для аэротенка-смесителя с учетом pH-фактора описывается следующей системой (ДУ):

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{C_i}{T} + \frac{\mu_{\max} (\text{опт.}pH) K_{pH} C_c C_i}{(K_c + C_c)(K_{pH} + 10^{(\text{опт.}pH-pH)} - 1)}, \quad (11)$$

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{вх}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max} (\text{опт.}pH) K_{pH} C_c C_i}{Y(K_c + C_c)(K_{pH} + 10^{(\text{опт.}pH-pH)} - 1)}. \quad (12)$$

Моделирование выполняется при ранее введенных параметрах и значениях pH соответствующим следующим значениям: кислая среда – 4; щелочная среда – 9; нейтральная среда – 7.

На рис. 11 представлены графики изменений концентраций ила и субстрата при различных pH . В кислой среде ($pH < 5$) АИ не развивается, что приводит к неудовлетворительному качеству очистки. Такой результат связан со снижением интенсивности обмена у микроорганизмов активного ила в кислой среде, что приводит к их гибели.

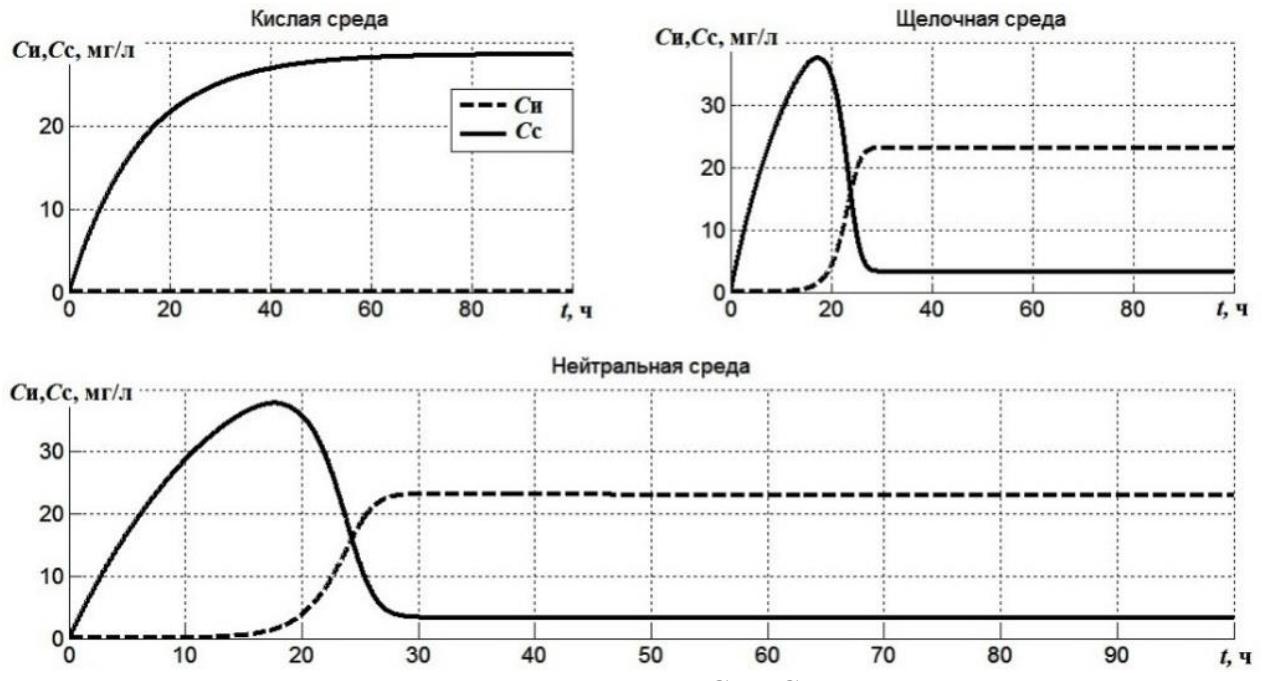


Рисунок 11 – Переходные процессы C_i и C_c при различных pH

Кривые C_i и C_c в щелочной и нейтральной средах ведут себя аналогично. Такой результат является неверным с точки зрения кинетики и биохимических свойств ила. Повышенный уровень pH приводит к интенсивному обмену веществ АИ, в результате чего микроорганизмы могут погибнуть. Модель Моно, в силу своего невысокого порядка, не учитывает всех особенностей состава АИ и их взаимосвязь с факторами внешней среды.

Исследование влияние pH -фактора в модели Герберта

Модель Герберта с учетом pH -фактора будет описываться следующей системой ДУ:

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{C_i}{T} + \frac{\mu_{\max}(\text{опт.}pH)K_{pH}C_cC_i}{(K_c + C_c)(K_{pH} + 10^{(\text{опт.}pH-pH)} - 1)} - bC_i, \quad (13)$$

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{bx}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}(\text{опт.}pH)K_{pH}C_cC_i}{Y(K_c + C_c)(K_{pH} + 10^{(\text{опт.}pH-pH)} - 1)}. \quad (14)$$

На рис. 12 представлены кривые изменения C_c и C_i в зависимости от различных значений pH . Результаты моделирования для модели Герберта аналогичны результатам, полученным ранее при анализе модели Моно. Кислая среда является неблагоприятной для развития АИ, но максимальная концентрация C_c в такой среде на 40% меньше, чем в модели Моно.

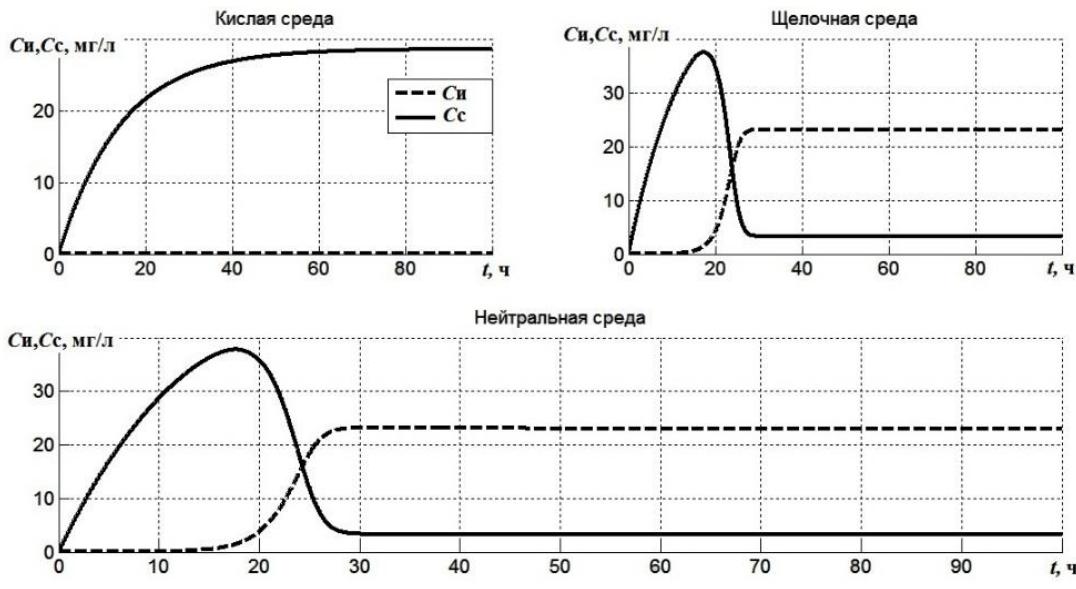


Рисунок 12 – Переходные процессы C_i и C_c при различных pH

Максимальная концентрация C_i в щелочной и нейтральных средах на 10 % меньше, чем при тех же параметрах для модели Моно. Удовлетворительный уровень очистки достигается только в нейтральной и щелочной средах.

Исследование влияния pH -фактора в модели Холдейна

Модель Холдейна с учетом pH -фактора описывается системой ДУ:

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{C_i}{T} + \frac{\mu_{\max}(\text{опт.}pH)K_{pH}C_cC_i}{(K_c + C_c + C_c^2/K_i)(K_{pH} + 10^{(\text{опт.}pH-pH)} - 1)}, \quad (15)$$

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{вх}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}(\text{опт.}pH)K_{pH}C_cC_i}{Y(K_c + C_c + C_c^2/K_i)(K_{pH} + 10^{(\text{опт.}pH-pH)} - 1)}. \quad (16)$$

На рис. 13 представлены графики переходных процессов C_i и C_c в различных pH -средах.

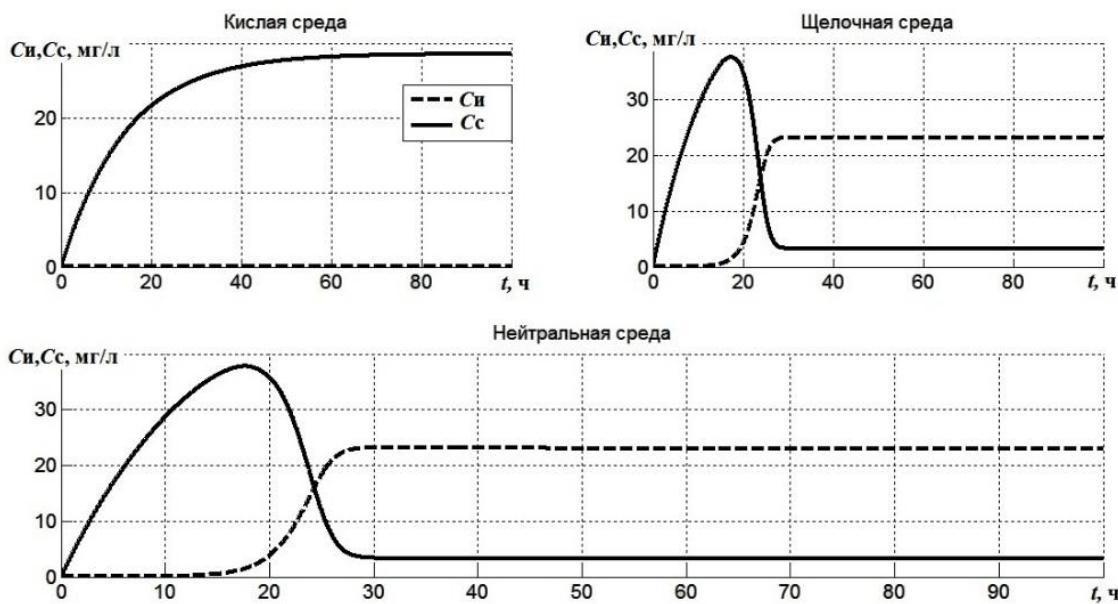


Рисунок 13 – Переходные процессы C_i и C_c при различных pH

Результаты, полученные при моделирование влияния pH -параметра для модели Холдейна аналогичны результатам, найденным ранее при анализе модели Моно и Герберта. Биомасса АИ развивается только в условиях нейтральной и щелочной среды.

Исследование влияния pH -фактора в модели Кенейла

Модель Кенейла при изменении pH -среды представляется следующей системой ДУ:

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{bx}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}(\text{опт.}pH) \exp^{\gamma(0-20)} C_c C_b}{Y(K_c + C_c)}, \quad (17)$$

$$\frac{dC_b}{dt} = -\frac{C_b}{T} + \frac{\mu_{\max}(\text{опт.}pH) \exp^{\gamma(0-20)} C_c C_b}{K_c + C_c} - \frac{f_{\max}(\text{опт.}pH) \exp^{\gamma(0-20)} C_n C_b}{g(K_b + C_b)}, \quad (18)$$

$$\frac{dC_n}{dt} = -\frac{C_n}{T} + \frac{f_{\max}(\text{опт.}pH) \exp^{\gamma(0-20)} C_n C_b}{g(K_b + C_b)}. \quad (19)$$

На рис. 14 представлены графики изменений концентраций C_c , C_n , C_b при различных значениях pH .

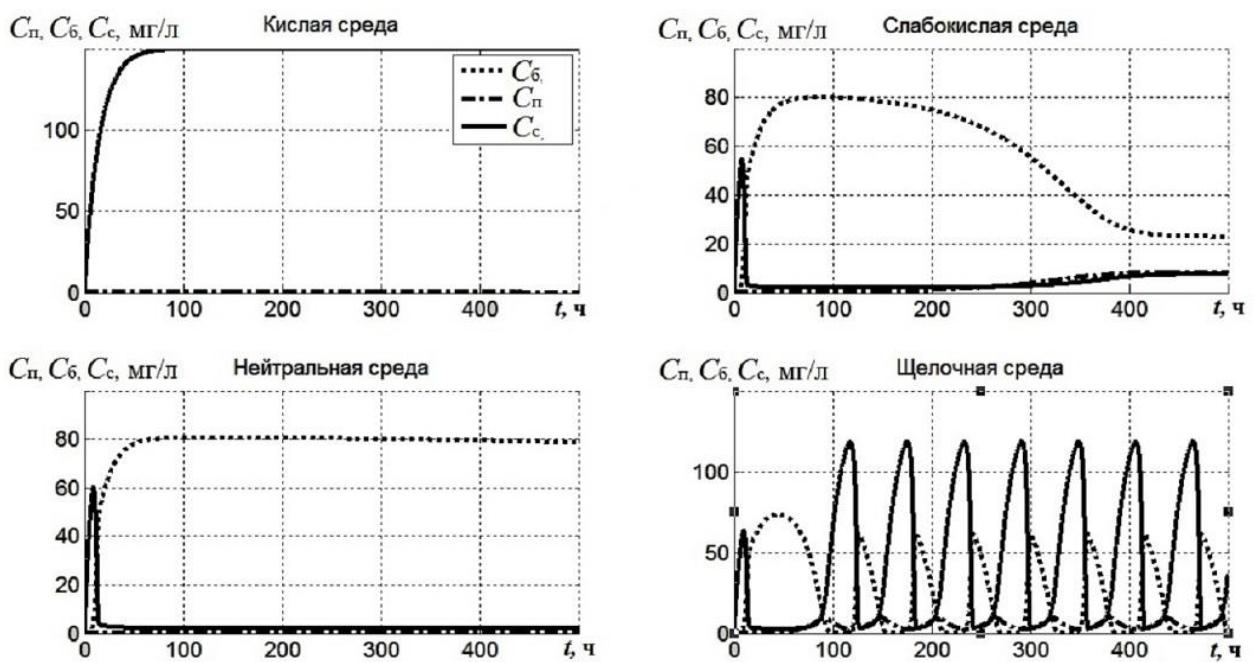


Рисунок 14 – Графики переходных процессов концентраций бактерий, простейших и субстрата при различных pH

При низких значениях pH биомасса АИ не развивается, в результате необходимый уровень биоочистки не достигается. В случае слабокислой среды (pH от 5 до 6,5) АИ развивается, но с течением времени его концентрация снижается на 75% по сравнению со своим максимальным значением. При высоких значениях pH (9,5) уровень очистки неудовлетворительный и процессы переходят в колебательное состояние. Наилучший уровень очистки достигается в нейтральной среде, когда оптимальные значения pH колеблются от 6,5 до 7,5.

Заключение. Анализ показал значительную чувствительность базовых моделей к изменениям температуры и pH внешней среды. Для каждой из них были выявлены температурные

режимы, на которых достигается наилучший уровень очистки. Уточнение границ температурных режимов требует дальнейших исследований для каждой из культур активного ила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Monod J. Rechercher sur la croissance des cultures bactériennes (Thèse Doctorat ès Sciences Naturelles). Paris: Herman et Cie, 1942. 210 p.
2. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G. v. R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1 Scientific and Technical Report London: IAWPRC, 1987. N 1. 37 p.
3. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод М.: Мир, 2009. 480 с.
4. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1979. 118 с.
5. Haldane. J. B. S. Enzymes. London: Longmans, 1930. 235 p.
6. Canale R. P. Predator-pray relationships in a model for activated process. Biotech. Bioeng, 1969, 11, N5. P. 887—907.
7. Фролов. Ю.П., Розенберг Г.С. Управление биологическими системами. Надорганизменный уровень. Самара: Самарский университет, 2002. 191 с.
8. Грудяева Е.К., Душин С.Е., Шолмова Н.Е. Анализ технологического процесса очистки сточных вод с мембранным биореактором//Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.№5. С.48—56.
9. Душин С. Е., Красов А.В., Кузьмин Н. Н. Моделирование систем управления: Учеб. пособие для вузов / под ред. С. Е. Душина. М.: Студент, 2012. 348 с.
10. Липунов И.Н. Очистка сточных вод в биологических реакторах с биопленкой и активным илом (расчет биофильтров и аэротенков): учебное пособие. Екатеринбург: Урал. Гос. Лесотехн. Университет, 2015. 110 с.
11. Яковлев, С. В., Карюхина Т. А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. Стройиздат, 1980. 200 с.
12. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур - М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.
13. Саловарова В.П., Трифонова Т.М. Окружающая среда и биотехнология: учеб. пособие. Иркутск: Иркут. Ун-та, 1995. – 84с.

Зайцев Сергей Владиленович (1), Жерносек Ирина Алексеевна (2)

1. Северо-Кавказский Федеральный Университет филиал в г. Пятигорске
2. Пятигорский медико-фармацевтический институт-филиал
ФУБОУ ВО "Волгоградский государственный медицинский университет"

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ МНОГОМЕРНОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДАЛЬНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация. В данной статье предложен метод идентификации многомерного объекта с использованием модальных воздействий. Для определения параметров объекта управления необходимо с помощью модальных синусоидальных воздействий на входах и измерением реакцией на выходах объекта управления идентифицировать объект виде модально-временной матрицы. Модально-временную матрицу получим с использованием разложение реакции объекта с помощью рядов Фурье. Используя полученную матрицу после идентификации можем произвести синтез одного из заданных регуляторов типа (Распределенный Высокоточный Регулятор (РВР) , Распределенный Интегральный Регулятор (РИР) и Распределенный Дифференциальный Регулятор (РДР). Если синтезированный регулятор не позволит получить требуемые показатели качества, произведем его адаптацию во время работы для улучшения показателей качества регулирования.

Ключевые слова: идентификация; регулятор адаптивный распределенный высокоточный регулятор; синтез регуляторов.

Annotation. This article takes see method identification multidimensional object with use inset function. For defining the parameters of the control object need with using sinusoid mode function inlet's and defining reaction's on outlet's of the control object, identification object with mode times matrix object. Mode times matrix object take with use reaction's on outlet's in view Furies series. Use mode times matrix object after identification make synthesis regulators (distributed high- precision regulator, distributed izodrominis regulator, distributed differential regulator). If synthesis of DIR not have need quality parameter of regulation in work and its adaptation while working to improve the performance quality of regulation.

Keywords: : regulator; distributed regulator; synthesis of regulators, Furies series.

Введение

Наиболее массовым регулятором, используемым в промышленности, является пропорционально-интегро-дифференцирующие (ПИД) регулятор. Данные регуляторы имеют оптимальные наилучшие показатели качества регулирования координатами технологического процесса. 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. 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 промышленности эксплуатируются системы с распределенными параметрами или многоканальные. Такие системы требуют новых методов синтеза и адаптивного управления, т.к. система получается взаимосвязанной, и передаточная матрица объекта часто является не диагонально доминантной.

Возможным решением этих проблем является разработка методов адаптивной настройки распределенного регулятора. Исследования методов адаптации и проверка результатов методов синтеза [3,4] проводились на лабораторном стенде [5].

Для идентификации объекта необходимо проанализировать объект управления (ОУ). Для получения передаточной матрицы объекта необходимо подать управляющие воздействия в виде:

- ступенчатой функции;
- синусоидальных сигналов (по методу исследования систем с распределенными параметрами).

В данной статье рассмотрим идентификацию объекта с помощью синусоидальных сигналов (по методу исследования систем с распределенными параметрами). Для идентификации системы поочередно подаем сигналы по соответствующим входным каналом в виде сигнала в соответствии с краевыми условиями по формулам приведённым ниже:

$$C_i(x) = A \cdot \cos(\Psi_i \cdot x), \quad \Psi_i = \frac{\pi \cdot i}{L_x}, \quad i = \overline{1, n}, \quad 0 < x < L_x, \quad (1)$$

где L_x протяженность объекта,

i - номер канала.

$$C_i(x) = A \cdot \sin(\Psi_i \cdot x), \quad \Psi_i = \frac{\pi \cdot i}{L_x}, \quad i = \overline{1, n}, \quad 0 < x < L_x \quad (2)$$

Формула 1 используется для изолированных граничных условий, а формула 2 для неизолированных граничных условий.

Первый опыт проводим, подавая на каждый канал сигнал где $A = 0,1A_{\text{ном}}$, а i равно номеру соответствующего канала, последующие опыты проводим циклически по очереди меняем индексы у подаваемых управляющих воздействиях. Например для 3х канальной системы:

- первый опыт $C_1(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_1)$; $C_2(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_2)$; $C_3(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_3)$

- второй опыт $C_1(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_3)$; $C_2(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_1)$; $C_3(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_2)$

- третий опыт $C_1(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_2)$; $C_2(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_3)$; $C_3(x) = 0,1A_{\text{ном}} \cdot \sin(\Psi_1)$

Каждый опыт заканчиваем через время равное окончанию 5 колебаний выходного сигнала установившегося режима определяем собственную передаточную функцию W_{ii} и взаимные передаточные функции W_{ig} . Для получения передаточных функций собственных и взаимных, используя разложение в ряд Фурье по спектрам мод оценочных

$$\widehat{a_{yi}} = a_{yi}(t) \frac{2}{\rho_k t} \int_{t_F}^{t_y + \bar{t}} y(t) \sin \Psi_i \, dt, \quad \widehat{a_{ui}} = a_{ui}(t) \frac{2}{\rho_k t} \int_{t_F}^{t_y + \bar{t}} u(t) \sin \Psi_i \, dt,$$

$$\widehat{\beta_{yi}} = \beta_{yi}(t) \frac{2}{\rho_k t} \int_{t_F}^{t_y + \bar{t}} y(t) \sin \Psi_i \, dt, \quad \widehat{\beta_{ui}} = \beta_{ui}(t) \frac{2}{\rho_k t} \int_{t_F}^{t_y + \bar{t}} u(t) \sin \Psi_i \, dt,$$

где $i=1 \dots n$

Получив оценки определяем параметры модели первой степени, имеющей вид:

$$W_{ig} = \frac{k_{ig}}{T_{ig} s + 1} e^{-\tau_{ig} s}$$

$$\hat{a}_k = \frac{\hat{a}_{yi} \hat{a}_{ui} + \hat{\beta}_{yi} \hat{\beta}_{ui}}{\hat{a}_{ui}^2 + \hat{\beta}_{ui}^2} \quad \hat{\beta}_k = \frac{-\hat{a}_{yi} \hat{\beta}_{ui} + \hat{\beta}_{yi} \hat{a}_{ui}}{\hat{a}_{ui}^2 + \hat{\beta}_{ui}^2} \quad \text{где } i=1 \dots n$$

$$\hat{T}_{ig}^2 = \frac{(\hat{a}_{ig}^2 + \hat{\beta}_{ig}^2) - (\hat{a}_{gi}^2 + \hat{\beta}_{gi}^2)}{\Psi_i^2 (\hat{a}_{gi}^2 + \hat{\beta}_{gi}^2) - \Psi_g^2 (\hat{a}_{ig}^2 + \hat{\beta}_{ig}^2)} \quad \hat{k}_{ig0} = (\hat{a}_{ig}^2 + \hat{\beta}_{ig}^2)(\hat{T}_{ig}^2 \Psi_g^2 + 1)$$

$$\hat{\tau}_{ig} = -\frac{1}{\Psi_i} \arctan \frac{\beta_i + \hat{T}_i \hat{a}_i}{\hat{a}_i - \hat{T}_i \hat{\beta}} \frac{\Psi_i}{\hat{\Psi}_i}$$

Для определения параметров модели необходимо приблизительно оценить: $k_{ig}(0)$ - коэффициент передачи системы по соответствующим собственным и взаимным каналам; $T_{ig}(0)$ - постоянная времени объекта по соответствующим собственным и взаимным каналам; $\tau_{ig}(0)$ - постоянная времени запаздывания по соответствующим собственным и взаимным каналам.

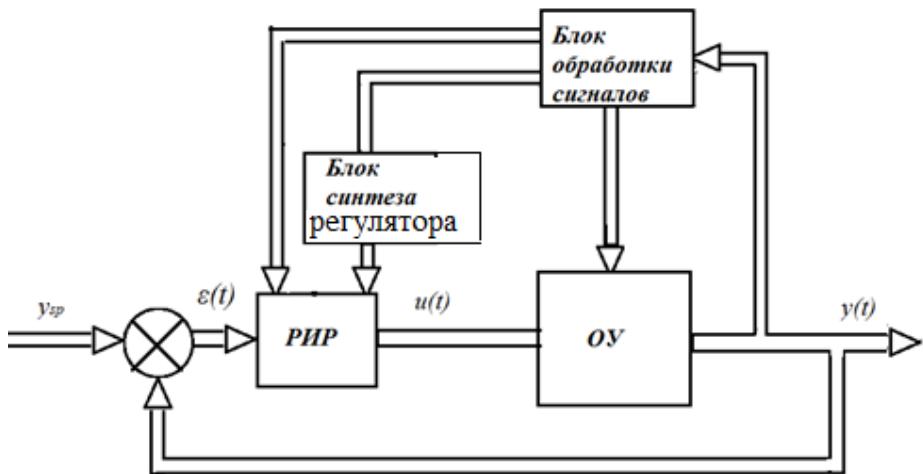


Рисунок 1 – Структурная схема РИР-регулятора

При проведении соответствующего числа испытаний равного количеству каналов получим передаточную матрицу объекта, которая будет иметь следующий вид

$$W = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & \dots & W_{1j} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & \dots & W_{2m} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & \dots & W_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{i1} & W_{i2} & W_{i3} & \dots & W_{ij} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

Из полученной матрицы (4) для синтеза системы желательно взять первую и последнюю моду объекта.

Передаточная функция РВР имеет вид:

Передаточная функция РВР имеет вид:

$$W(G, s) = E_1 \left(\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{G}{n_1} \right) + E_2 \left(\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{G}{n_2} \right) s + E_4 \left(\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{G}{n_4} \right) \frac{1}{s}, \quad (5)$$

где: G - обобщенная координата; S - оператор Лапласа

n_1, n_2, n_4 - весовые коэффициенты соответственно усилительного дифференцирующего и интегрального распределенных звеньев; E_1, E_2, E_4 - коэффициенты пропорциональности соответственно усилительного дифференцирующего и интегрального распределенных звеньев.

Синтез РВР проведем по алгоритму изображенному на рисунке 2 согласно литературе [3,4,5]

В данном алгоритме: k_{11}, k_{ii} - коэффициенты передачи, найденные согласно формулам (3);

T_{11}, T_{ii} - постоянные времени объекта; $\omega_{cp1}, \omega_{cpi}$ - частоты среза объекта по первой и последней модам, (значение параметров и их индексы соответствуют значениям и индексам из передаточной матрицы (4))передаточной матрице (4) согласно формулам (3)).

K_{y1}, K_{yi} - коэффициенты усиления регулятора по соответствующим модам, найденные по

формуле $K_{yi} = \frac{1}{k_{ii}}$ на частоте среза $\Delta\omega^2 = \frac{\omega_{cpi}^2}{\omega_{cp1}^2}$ - соотношение квадратов частот среза; $\Delta M = \frac{K_{yi}}{K_{y1}}$

- отношение коэффициентов усиления по соответствующим модам; $G_1 \dots G_i$ - значения обобщенных координат; $\Delta = \log(\omega_1) - \log(\omega_i)$ - разница между логарифмами частот среза

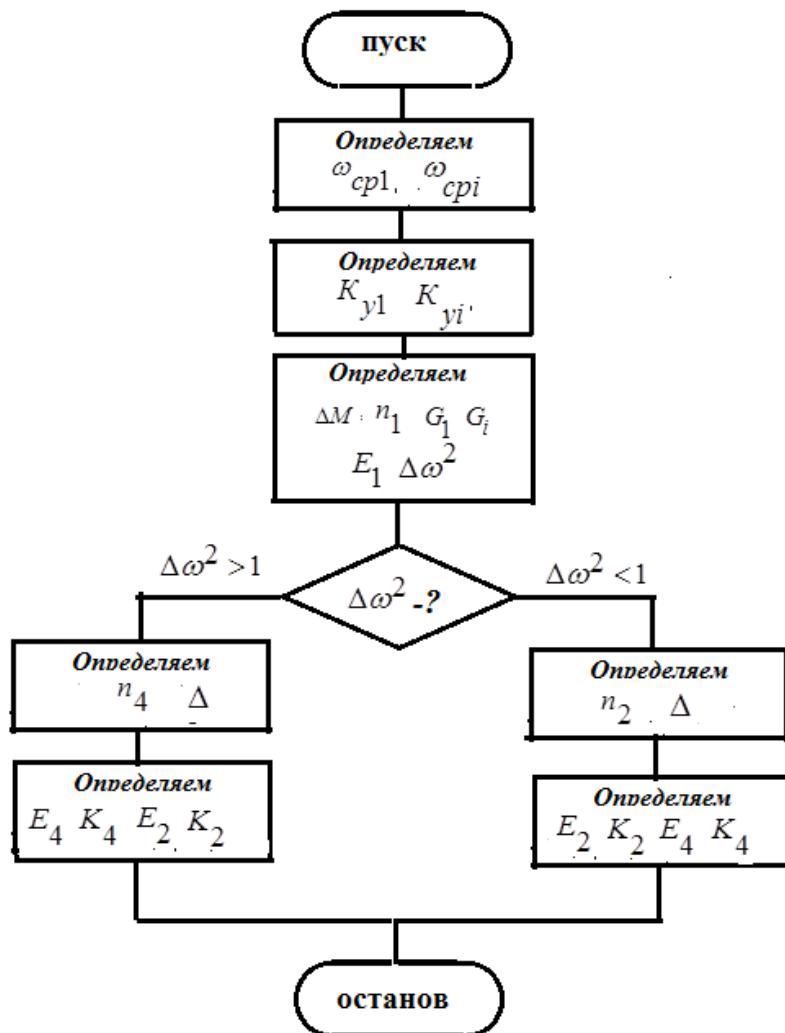


Рисунок 2 – Алгоритм синтеза РВР

По окончанию работы программы идентификации и синтеза регулятора РВР систему переводим в режим работы и при наличии отклонений от заданной ошибки подбираем E_1, E_2, E_4 . Для получения новых параметров необходимо изменить параметр Δ (ширина зоны перегиба между частотой среза первой моды и последней модой). Увеличение Δ снижает колебательность системы. Пересчитав параметры, согласно приведенной в литературе [6] методике, получим новые параметры РВР таким образом подстроим регулятор для более качественной работы согласно алгоритма на рис.3.

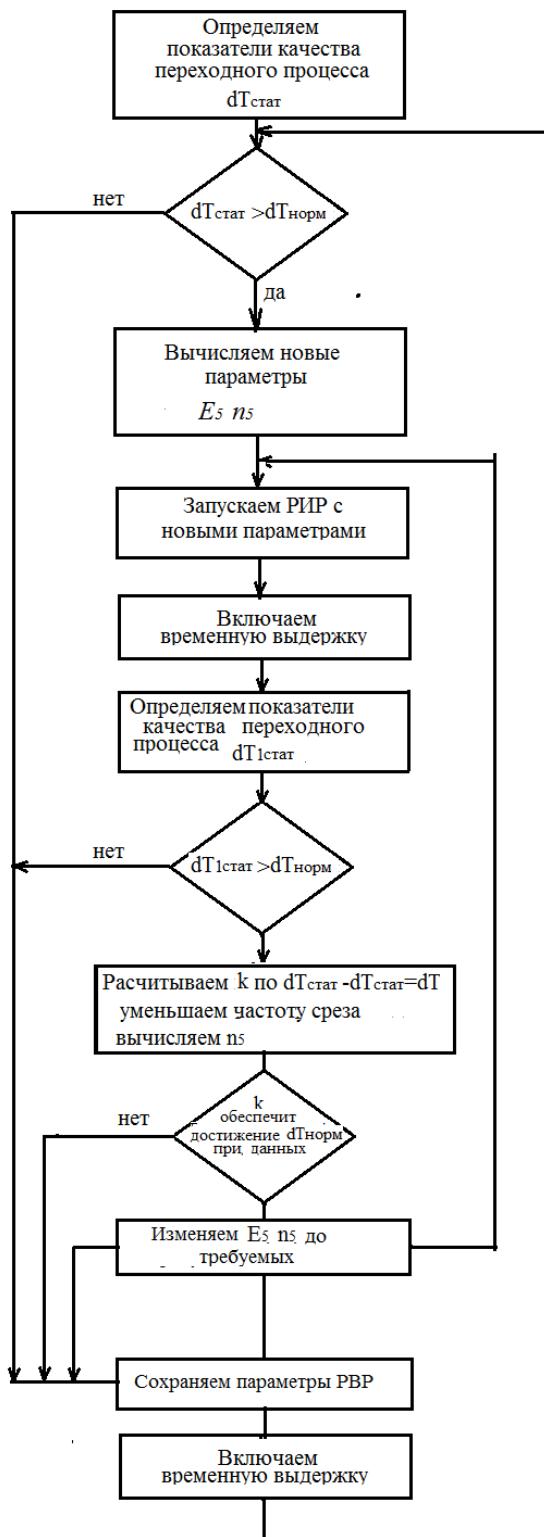


Рисунок 3 – Алгоритм адаптации РВР

Данную методологию желательно применять, когда объект малоинерционный порядка десятка секунд, система не обладает свойствами диагональной доминантности передаточной матрицы и не пространственно инвариантна, что позволяет уменьшить колебательность выходного параметра.

Вывод. Данную методологию желательно применять, когда объект не обладает свойствами диагональной доминантности передаточной матрицы и не пространственно инвариантна, что позволяет уменьшить колебательность выходного параметра

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. 36-48 с.
2. Александров А.Г. Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД регуляторов в технических системах// Автоматика и телемеханика № 2, 2014. 16-30 с.
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. Воронин А.Ю., Зайцев С.В. Синтез пространственного регулятора тепловой камеры пищевого производства// Системный анализ и прикладная синергетика: тезисы доклада на 4 международной конференции г. Пятигорск, 2011. 194-199 с.
6. Зайцев С.В. Методика адаптивной настройки РВР// Материалы Всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу» Т 3 (часть 1), – Пятигорск: ФГАОУ ВПО СКФУ филиал в г. Пятигорске, 2013. 215 с.
7. Дровосекова Т.И., Сизов С.Б. Параллельные вычисления в приложении к задаче моделирования физических процессов// В мире научных открытий. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2014. № 6.1 (54). С. 338-349.
8. Drovosekova T.I., Zhernosek I.A. Modeling of hydrolitosferic processes from the Caucasian Mineralnye Vody Region//In the world of scientific discoveries, Series B. 2013. vol. 1, № 1 - pp. 44-52. doi: 10.12731/wsdb201315.

*Ильюшин Юрий Валерьевич, Первухин Дмитрий Анатольевич, Калугин Сергей Петрович,
Сенчило Никита Дмитриевич, Коржавина Наталья Александровна*

Санкт-Петербургский горный университет

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ БОЕВОЙ ЭФЕКТИВНОСТИ

Аннотация. В данной работе представлено развитие теоретических основ анализа и синтеза нелинейных распределённых систем управления с целью применения их для повышения живучести, теплостойкости, износостойкости, надёжности, эксплуатационной технологичности производства артиллерийских стволов Сухопутных войск. Проанализированы физические процессы горения пороховых газов. Рассмотрена газовая динамика процесса течения гомогенно-гетерогенной газовой смеси в осесимметричной цилиндрической постановке и в трёхмерной постановке.

Ключевые слова: артиллерия, анализ, синтез, распределенные системы, вооружение и военная техника.

Annotation. In the given work development of theoretical bases of the analysis and synthesis of nonlinear distributed control systems with the purpose of their application for increase of survivability, heat resistance, wear resistance, reliability, operational technological efficiency of production of artillery trunks of the Land forces is presented. The physical processes of combustion of powder gases are analyzed. The gas dynamics of the flow of a homogeneous-heterogeneous gas mixture in an axisymmetric cylindrical setting and in a three-dimensional formulation is considered.

Keywords: artillery, analysis, synthesis, distributed systems, armament and military equipment.

Введение

Непрерывный рост мощности артиллерийских орудий сопровождается повышением начальной скорости снаряда, максимального давления пороховых газов, увеличением массы заряда и повышением скорострельности. Это приводит к интенсивному разогреву ствола при выстреле, в связи с чем все большее значение приобретают вопросы исследования влияния разогрева стенок ствола на их прочность при выстреле и кучность стрельбы [1-9]. Рассмотрение вопросов, связанных с нагреванием стволов во время стрельбы представляет значительный теоретический и практический интерес по следующим причинам.

1. Нагрев орудийных стволов может оказаться серьезным препятствием для дальнейшего повышения мощности артиллерийских орудий, так как повышение мощности орудия связано с увеличением интенсивности нагрева, что влечет за собой увеличение температуры внутренней поверхности ствола и, следовательно, интенсивности износа при значительном снижении живучести.

2. Повышение температуры внутренней поверхности ствола влечет за собой увеличение перепада температуры по толщине его стенок. Вследствие этого увеличиваются температурные напряжения в стволе. В связи с возникновением температурных напряжений появляется необходимость оценить их влияние на общее напряженное состояние разогретого ствола при выстреле.

3. Вследствие разогрева ствола возникает также необходимость оценки влияния разогрева ствола на различные марки стали, применяемые при его изготовлении, как с точки зрения выявления степени понижения механических качеств стали при нагреве, так и с точки зрения выявления условия теплообмена между газами и стенками, в результате которого происходит потеря некоторой части энергии, заключенной в пороховом заряде, и следовательно, уменьшается коэффициент полезного действия орудия [8-12].

4. Условия движения снаряда в разогретом стволе влияют на функционирование ведущего пояска и кучность стрельбы. Разрешение этого вопроса особенно важно в связи с дальнейшим

увеличением мощности орудий зенитной и противотанковой артиллерии с одновременным требованием повышения кучности и точности стрельбы.

5. Нагрев стволов ведет к изменению жесткости что в свою очередь в значительной степени изменяет статический прогиб стволов от собственной массы и в еще большей степени влияет на динамический изгиб при выстреле, что приводит к увеличению рассеивания снарядов при стрельбе.

6. Нагрев стволов вызывает тепловые деформации деталей ствольной группы, величины которых необходимо знать при конструировании в целях установления рациональных зазоров для сопряжения элементов между со-бой.

Таким образом в данной работе будет проведено численное моделирование внутрикамерных при срабатывании артиллерийского орудия с учётом горения порохового заряда, движения снаряда и функционирования дульного тормоза.

Постановка задачи. После зажигания навески воспламенителя пиропатроном, которая расположена внутри порохового заряда у дна каморы, пороховой заряд прогревается и постепенно воспламеняется [10-14]. Горение порохового заряда происходит в нестационарном и турбулентном режиме.

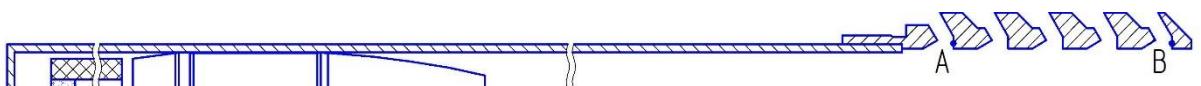


Рисунок 1 – Общая принципиальная компоновочная схема артиллерийского орудия среднего калибра: камора, ствол, пороховой заряд, снаряд, дульный тормоз

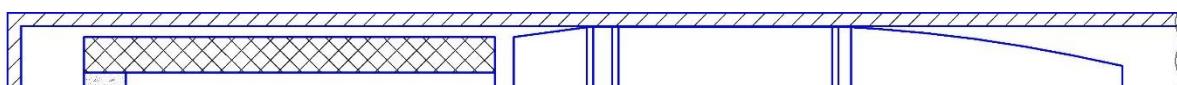


Рисунок 2 – Часть компоновочной схемы артиллерийского орудия среднего калибра: пороховой заряд с навеской воспламенителя и снаряд

Поскольку в канале ствала между пространствами за снарядом и перед снарядом полная герметичность отсутствует, продукты сгорания порохового заряда просачиваются из заснарядного пространства в предснарядное. При достижении продуктами сгорания некоторого уровня давления, называемого давлением страгивания, в каморе начинается движение снаряда. Происходит постепенное врезание ведущего пояска снаряда в нарезы ствола, в процессе которого снаряд в режиме скольжения входит в ствол. За счёт интенсивного поступления продуктов сгорания с поверхности заряда и наличия свободного объёма, в заснарядном пространстве возникают нестационарные колебания давления (и других газодинамических параметров). За счёт нарастания давления снаряд динамично ускоряется, продолжая своё движение по стволу артиллерийского орудия. Постепенно выражаются нестационарность процесса горения и колебательный режим течения продуктов сгорания порохового заряда. Также по длине порохового заряда постепенно выгорает горящий свод. При вылете снаряда из канала ствола происходит его газодинамическое взаимодействие с дульным тормозом. Разворачивая поток продуктов сгорания порохового заряда, выходящих из канала ствола, дульный тормоз генерирует отрицательную реактивную силу и тем самым снижает силу отката артиллерийского орудия при выстреле.

Математическая (дифференциальная) модель

Процесс нестационарного прогрева, последующего воспламенения и нестационарного и турбулентного горения пороха основывается на модели Мержанова – Дубовицкого, с учётом влияния газовой фазы на процесс горения в конденсированной фазе (к-фазе). Согласно этим представлениям, порох рассматриваем как твёрдое тело. Тогда Процесс нестационарного прогрева, последующего воспламенения и нестационарного и турбулентного горения пороха основывается на модели Мержанова – Дубовицкого, с учётом влияния газовой фазы на процесс горения в

конденсированной фазе (k -фазе). Согласно этим представлениям, порох рассматриваем как твёрдое тело.

Процесс нестационарного прогрева, воспламенения и горения пороха описывается следующей системой уравнений [5]:

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} = \kappa_k \cdot \frac{\partial^2 T_k}{\partial y_k^2} + v_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial y_k} + \frac{Q_k}{c_k} \cdot \Phi_k(T_k); \quad \frac{\partial \beta}{\partial t} = v_k \cdot \frac{\partial \beta}{\partial y_k} + \Phi_k(T_k), \quad (1)$$

$$\Phi_k(T_k) = Z_k \cdot \exp\left(-\frac{E_k}{R_0 \cdot T_k}\right)$$

где

До воспламенения (порох еще не горит) - $v_k = 0$. Условие воспламенения и последующего горения имеет вид: $\beta_s = \beta_* = 1$.

До момента воспламенения граничные и начальные условия для системы уравнений (1) имеют вид [8]:

$$\begin{aligned} & t = 0, y_k \geq 0, T_k = T_0, \beta = 0; \\ & t \geq 0, y_k = 0, -\lambda \cdot \frac{\partial T_k}{\partial y_k} = \alpha_\tau \cdot (T_g - T_s), \beta < \beta_*; \\ & t \geq 0, y_k = \infty, T_k = T_0, \beta = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

После воспламенения уравнение (1) следует решать совместно с уравнениями, описывающими процесс горения с помощью параметров газовой фазы. Согласно, на поверхности горения пороха следует выставлять граничные условия четвёртого рода:

$$\begin{aligned} & t > t_*, y_k = 0, T_k = T_s, \beta_s = \beta_*; \\ & -\lambda_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial y_k} = q_s - (c_{ps} - c_k) \cdot \rho_k \cdot v_k \cdot T_s - \left(\alpha - \frac{1}{\rho_k}\right) \cdot \rho_k \cdot v_k \cdot p \\ & t > t_*, y_k = \infty, T_k = T_0, \beta = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где q_s - плотность теплового потока, направленного со стороны газовой фазы на поверхность пороха.

Полная плотность теплового потока q_s , в соответствии с подходом Ленуара-Робийяра-Каракозова, развитым в работе, состоит из двух слагаемых:

$$q_s = q_p + q_u,$$

где q_p - плотность теплового потока, зависящего от давления, q_u - плотность теплового потока, обусловленная течением газа вдоль поверхности горения.

Нестационарные и турбулентное горение порохового заряда, происходящие

После его воспламенения, проходят в условиях интенсивного обдува продуктами сгорания поверхности горения. В этот период времени

$$q_p \approx q_p^0 \ll q_u.$$

В процессе повышения давления q_p приобретает величину, соизмеримую с q_u , при этом выражается нестационарность в k -фазе и $q_p \rightarrow q_p^0$.

Отсюда следует, что полную плотность теплового потока на поверхность горения на протяжении всего периода горения порохового заряда можно приближённо (но с достаточной точностью) определять, как

$$q_s = q_p^0 + q_u \quad (4)$$

где значение плотности теплового потока, зависящего от давления, q_p^0 может быть получено из (3) с учётом

$$-\lambda_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial y_k} = c_k \cdot \rho_k \cdot v_k^0 \cdot \left(T_s - T_0 - \frac{Q_k}{c_k} \right),$$

по заведомо известному значению стационарной скорости горения пороха

v_k^0 , которое, в свою очередь, может быть определено, например, экспериментально в приборе постоянного давления.

При нахождении конвективной составляющей плотности теплового потока q_u учитываем, что в условиях обдува поверхности горения толщина пограничного теплового слоя δ_m имеет слабо выраженную связь с толщиной динамического пограничного слоя. В этом случае значения δ_m определяется в первую очередь не гидродинамическими, а тепловыми эффектами. Согласно [2] имеет:

$$\begin{aligned} q_u &= 0.023 \cdot \mu_* \cdot c_{p^*} \cdot \delta_m^{-1} \cdot \text{Re}_{\delta_m}^{0.75} \cdot \text{Pr}_{\delta_m}^{-0.6} \cdot \left(1 + \sqrt[3]{\text{Pr}} \cdot \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right)^{-0.55} \cdot (T_g - T_s) \cdot \varepsilon_b \\ \text{Re}_{\delta_m} &= \frac{\rho_* |W_g - W_k| \cdot \delta_m}{\mu_*}; \\ \text{Pr} &= \frac{\mu_* \cdot c_{p^*}}{\lambda_*}; \\ \delta_m &= \frac{2 \cdot \mu_s \cdot c_{ps} \cdot (T_g - T_s)}{\text{Pr} \cdot \rho_k \cdot v_k \cdot [c_{p^*} \cdot (T_s - T_g) + Q_{\alpha\beta}]}; \\ \varepsilon_b &= \frac{B}{\exp(B) - 1}; \\ B &= \frac{8 \cdot \rho_k \cdot v_k}{\rho_* \cdot |W_g - W_k| - c_x}, \end{aligned} \quad (5)$$

где - $Q_{\alpha\beta}$ суммарное тепловыделение газовой фазы, относящейся к зоне горения пороха, а нижний индекс «*» характеризует определяющие параметры, которые равны среднему значению между соответствующими параметрами на поверхности горения и в ядре потока.

Значения параметров, которые соответствуют поверхности горения пороха (точнее параметров горения со стороны газовой фазы), необходимые в уравнении (5), определяются из следующих эмпирических соотношений:

$$c_{ps} = \left(0.46 - \frac{55}{T_s} \right) \cdot 4.1868 \cdot 10^3;$$

$$\mu_s = \left[0.714 + 0.315 \cdot \left(\frac{T_s}{1000} \right)^2 - 0.00714 \cdot \left(\frac{T_s}{1000} \right)^3 \right] \cdot 3.945 \cdot 10^{-5};$$

$$\lambda_s = (0.167 \cdot \sqrt{T_s} - 2.67) \cdot 4.1868 \cdot 10^{-2};$$

$$\rho_s = \frac{P}{\alpha \cdot P + \left(c_{ps} - \frac{c_{ps}}{k} \right) \cdot T_s}.$$

Суммарное тепловыделение газовой фазы зоны горения пороха можно определить следующим образом:

$$Q_{\alpha\beta} = \int_{T_s}^{T_g} c_p dT$$

подставив из (6) в (7) выражение для c_{ps} , имеем:

$$Q_{\alpha\beta} = 1925.928 \cdot (T_g - T_s) - 230274 \cdot \ln \left(\frac{T_g}{T_s} \right),$$

либо

$$Q_{\alpha\beta} \approx (T_g - T_s) \cdot \left(\frac{c_p + c_{p*}}{2} \right)$$

Особенность задачи (1) – (9) состоит в сильном изменении температуры небольшом слое пороха непосредственно у поверхности и незначительном нагреве в более глубоких слоях. С учётом данного факта пространственная система координат преобразуется в соответствии с соотношением

$$y_1 = 1 - \exp(-\xi \cdot h); h = \frac{y_k}{y_0},$$

где ξ - коэффициент преобразования. Такое преобразование позволяет получить более точное решение вблизи поверхности горения.

При переходе от режима зажигания к режиму горения возникает потребность в изменении характерных масштабов времени и длины.

В качестве характерных величин для режима зажигания используются:

$$y_0 = \frac{\lambda_k \cdot (T_* - T_0)}{\alpha_r (T_g - T_0)}; t_0 = \frac{y_0^2}{\kappa_k}; V_0 = \frac{y_0}{t_0}$$

где T_* - некоторая характерная температура воспламенения пороха.

В режиме горения характерные масштабы существенно зависят от давления. Характерное время, за которое изменяется прогретый пороховой слой, определяется следующим образом:

$$t_0 = \frac{\kappa_k}{V_k^2} \rightarrow \frac{1}{\rho^{2\nu}}$$

а связанная с ним характерная длина определяется как

$$y_0 = \sqrt{t_0 \cdot \kappa_k} \rightarrow \frac{1}{\rho^\nu}.$$

Для математического описания процесса газодинамического течения в каморе, стволе и дульном тормозе артиллерийского орудия используем подходы механики сплошных многофазных сред.

Первой фазой считаем гомогенную смесь продуктов сгорания навески воспламенителя, порохового заряда и воздуха. Второй фазой – несгоревшую часть порохового заряда. Считаем, что обе фазы в совокупности составляют гомогенно-гетерогенную смесь, где каждая фаза, занимая часть общего объёма смеси, имеет собственную температуру и скорость движения. Их движение рассматриваем как движение взаимопроникающих, взаимодействующих сред.

С пространственной точки зрения исследуется процесс течения гомогенно-гетерогенной смеси в двухмерной осесимметричной (цилиндрической) постановке. Газообразные продукты сгорания рассматриваем как полностью прореагировавший идеальный газ. В силу конструктивных ограничений вторая фаза гетерогенной смеси не участвует в движении. Пренебрегаем тепловыми потерями в стенки каморы, ствола, дульного тормоза и снаряда. Также пренебрегаем силовым и тепловым межфазным взаимодействием.

С учётом допущений, о которых упомянуто выше, полная нестационарная система вихревых дифференциальных уравнений газовой динамики для потока гомогенно-гетерогенной смеси в каморе, стволе и дульном тормозе артиллерийского орудия запишется в виде:

уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_g W_1) &= G_{gb} + G_w; \\ \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_p W_1) &= G_{pb}; \\ \rho_1 &= \rho_g + \rho_p; \\ \frac{\partial (\rho_g \phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_g \phi W_1) &= \phi_{gb} \cdot G_{gb} + \phi_w \cdot G_w; \quad \phi = \mu, \lambda, \alpha; \\ \frac{\partial (\rho_1 \psi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 \psi W_1) &= \psi_{eb} \cdot G_b + \psi_w \cdot G_w; \quad \psi = k, c_p \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} &= -G_b - G_w; \end{aligned} \tag{11}$$

уравнения сохранения импульса по осям координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_1 v_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 v_1 W_1) + \alpha \cdot \frac{\partial P}{\partial r} &= 0; \\ \frac{\partial (\rho_1 w_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 w_1 W_1) + \alpha \cdot \frac{\partial P}{\partial z} &= 0; \end{aligned} \tag{12}$$

уравнение сохранения полной удельной энергии смеси

$$\frac{\partial (\rho_1 E_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 E_1 W_1) + \operatorname{div}(\alpha P W_1) = J_{eb} \cdot G_b + J_w \cdot G_w \tag{13}$$

где для цилиндрической системы координат –

$$\begin{aligned} (\xi W_1) &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (r \xi v_1)}{\partial r} + \frac{\partial (\xi W_1)}{\partial z}, \\ \xi &= (\rho_i, \rho_g \phi, \rho_1 \psi, \rho_1 v_1, \rho_1 w_1, \rho_1 E_1, \alpha P); \\ i &= (g, \rho), \quad \phi = (\mu, \lambda, \alpha), \quad \psi = (k, c_p). \end{aligned}$$

Для замыкания системы дифференциальных уравнений (11) – (13) используем уравнение состояния в виде

$$P = (k - 1) \cdot \rho_1^{uc} \cdot \left(E_1 - \frac{W^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{1 - \alpha \cdot \rho_1^{uc}}. \quad (14)$$

Для математического описания процесса газодинамического течения в каморе, стволе и дульном тормозе артиллерийского орудия используем подходы механики сплошных сред.

Считаем, что воздух и газообразные продукты сгорания порохового заряда представляют собой гомогенную смесь газов. С пространственной точки зрения исследуем процесс течения газовой смеси в полной – нестационарной и трёхмерной постановке. Газообразные продукты сгорания рассматриваем как полностью пропреагировавший идеальный газ. Пренебрегаем тепловыми потерями в стенки каморы, ствола, дульного тормоза и снаряда.

С учётом допущений, о которых упомянуто выше, полная нестационарная система вихревых дифференциальных уравнений газовой динамики для гомогенного газового потока в каморе, стволе и дульном тормозе артиллерийского орудия запишется в виде:

уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho W) &= 0 \\ \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \phi W) &= 0; \quad \phi = k, c_p, \alpha; \end{aligned} \quad (15)$$

уравнения сохранения импульса по осям координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u W) + \frac{\partial P}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v W) + \frac{\partial P}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w W) + \frac{\partial P}{\partial z} &= 0; \end{aligned} \quad (16)$$

уравнения сохранения полной удельной энергии смеси

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E W) + \operatorname{div}(P W) = 0, \quad (17)$$

где для декартовой системы координат –

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\xi W) &= \frac{\partial(\xi u)}{\partial x} + \frac{\partial(\xi v)}{\partial y} + \frac{\partial(\xi w)}{\partial z} \\ \xi &= [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho E, P]. \end{aligned}$$

Для замыкания системы дифференциальных уравнений (15) - (17) используем уравнение состояния

$$P = (k - 1) \cdot \rho \cdot \left(E - \frac{W^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{1 - \alpha \cdot \rho} \quad (18)$$

Заключение

Математическое моделирование позволяет посредством математических символов и зависимостей составить описание функционирования технического объекта в окружающей внешней среде, определить выходные параметры и характеристики, получить оценку показателей эффективности и качества, осуществить поиск оптимальной структуры и параметров объекта. Применение математического моделирования при проектировании в большинстве случаев

позволяет отказаться от физического моделирования, значительно сократить объёмы испытаний и доводочных работ, обеспечить создание технических объектов с высокими показателями эффективности и качества. В данной работе проанализирована проблематика рассматриваемых задач проектирования современной артиллерийской техники, подтверждено, что вычислительный эксперимент может успешно применяться для решения нестационарных и глубоко нелинейных задач. Выполнена постановка задачи численного моделирования. Разработана комплексная физико-математическая модель внутрикамерных процессов, протекающих при срабатывании артиллерийского орудия, включающая горение порохового заряда, газовую динамику процесса течения.

Особенностью модели является трёхмерная постановка граничных условий на сложной криволинейной образующей области интегрирования, включая подвижную область – поверхность снаряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ RU 5517 U2 «Боевой модуль АУ-220М с артиллерийской установкой для размещения на военной технике».
2. Тарасов В.С., Веренинов И.А., Ерунов В.Я. Моделирование технологических процессов с распределёнными правами. – Л.: ЛПИ, 1978.
3. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления т. II: Учеб. для втузов. В 2-х т. Т. П: – М: Интеграл-Пресс, 2000.
4. Орлов Б.В., Ларман Э.Х., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. – М.: Изд-во: Машиностроение, 1976. - 430с.
5. Алексеев А.А., Имаев Д.Х., Кузьмин Н.Н., Яковлев В.Б. Теория управления/ Под ред. В.Б. Яковleva. – СПб.: ГЭТУ, 1999.
6. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1981.
7. Давыдов Ю. М. Крупных частиц метод / В кн.: Математическая энциклопедия. Т. 3. –М.: Советская энциклопедия, 1982, с. 125-129.
8. Давыдов Ю. М. Крупных частиц метод // В кн.: Математический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1988, с. 303-304.
9. Давыдов Ю. М. Метод «крупных частиц» для задач газовой динамики. – Диссертация на соиск. уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. – М.: МФТИ, 1970. – 183 с.
10. Давыдов Ю. М. Многопараметрические схемы расщепления для решения пространственно-трёхмерных нестационарных задач // Доклады академии наук СССР, 1979, т. 247, № 6, с. 1346-1350.
11. Давыдов Ю. М. Нестационарный метод расчета газодинамических задач / Отчёт ВЦ АН СССР и МФТИ, № 173. – М.: ВЦ АН СССР, 1968. – 29 с.
12. Першин И.М. Синтез систем с распределёнными параметрами: проблемы и перспективы // Управление и информационные технологии УИТ-2004 / 2-я Всероссийская научн. Конф. Сб. докл. Т.1.Пятигорск – 2004.
13. Першин И.М. Частотный метод синтеза систем с распределёнными параметрами // Интеллектуальные системы. Труды симпозиумы под ред. К.А. Пузанкова. СПб., 1996.
14. Першин И.М. Анализ систем с распределёнными параметрами. Пятигорск. – 2004.

*Кленов Дмитрий Викторович (1), Львов Алексей Арленович (1),
Львов Петр Алексеевич (2), Кузин Сергей Александрович (2), Светлов Михаил Семенович (3)*

1. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
2. Энгельсское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глушарева
3. Институт проблем точной механики и управления РАН

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ДАТЧИКОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНОГО РАДИОКАНАЛА СВЯЗИ

***Аннотация.** В работе представлена новая распределенная измерительная система, основанная на использовании беспроводной сети интеллектуальных датчиков, информация с которых передается на пункты ее сбора по радиолокационно-му каналу связи. Для датчиков в различных узлах распределенной измерительной системы применяется новый тип формирователя сигналов в виде петли переменного тока. Описана оптимальная процедура оценивания параметров сигналов с датчиков, включенных в токовую петлю, основанная на решении получающихся уравнений по методу максимального правдоподобия. Процедура состоит из двух этапов: на первом находится нулевое приближение решения системы нелинейных уравнений, а на втором этапе используется итеративный алгоритм поиска уточненного решения с помощью неопределенных множителей Лагранжа. Предлагаемая процедура позволяет существенно повысить точность измерения с одновременным снижением стоимости системы в целом.*

Ключевые слова: распределенное измерение, радиолокационная сеть датчиков, интеллектуальный датчик, принцип максимального правдоподобия оценки.

***Annotation.** This paper presents a new distributed measurement system topology, which applies radar-based intelligent sensors network. The nodes of the distributed measurement system use an alternative current loop circuit as a signal conditioner of the sensor system. The optimal model parameter estimation procedure based on the maximum likelihood method is described. It consists of two stages. The first stage is associated with the initial solution approximation for the obtained non-linear equation system for sensor responses. At the second stage the improvement of this solution is made using the iterative algorithm with Lagrange multiplier technique. The convenient sensor system estimation technique drastically simplifies the necessary calculations as well as diminishes the whole system cost.*

Keywords: Distributed measurement, radar-based sensor network, intelligent sensor, maximum likelihood parameter estimation.

1. Введение

Контроль состояния современных летательных аппаратов (ЛА) и управления ими в процессе испытаний и эксплуатации является актуальной задачей авиастроения. Одним из наиболее перспективных путей решения этой задачи, не получившим пока широкого распространения, является непрерывный мониторинг состояния всех подсистем ЛА с помощью технологии беспроводных систем датчиков.

В настоящее время для мониторинга современных ЛА и управления ими, как правило, используется центральный вычислитель (контроллер или специальный универсальный компьютер), позволяющий координировать функционирование большого количества отдельных блоков и подсистем, составляющих управляемый объект. С приходом технологий распределенного сбора информации стали активно развиваться системы управления, основанные на беспроводных устройствах связи. Это позволяет не только упростить установку измерительной аппаратуры на ЛА и снизить стоимость ее обслуживания, но также существенно сократить объем используемых кабельных линий связи, что снижает общий вес устанавливаемого оборудования [1-3].

В условиях действия разнообразных помех, как правило, высокой интенсивности, что характерно для ЛА, наиболее перспективным представляется использование радиоканала (РК) связи. Предлагаемая работа посвящена созданию распределенной измерительной системы датчиков

ЛА на основе применения беспроводной связи по РК в сочетании с технологией петли переменного тока [4], используемой для создания формирователей сигнала наборов датчиков, обслуживающих конкретные узлы и подсистемы ЛА. Приводятся топология всей системы и универсальная методика сбора информации с датчиков различной физической природы, обслуживающих отдельный объект, которая позволяет существенно снизить влияние соединительных проводов на результат измерения отдельного датчика, что значительно повышает точность измерения в целом.

2. Топология распределенной информационно-измерительной системы

Анализ известных распределенных информационно-измерительных и информационно-управляющих систем (ИИС, ИУС), основанных на беспроводных мультисенсорных сетях [5-7], показал, что наиболее удачной является иерархическая структура организации системы сбора информации. На первом (нижнем) иерархическом уровне находятся датчики – источники информации о контролируемых параметрах или подсистемах ЛА; на втором (среднем, промежуточном) – автономные вычислительные устройства (концентраторы), снабженные приемопередатчиками сигналов, к которым присоединяется несколько датчиков, осуществляющих сбор информации о конкретном узле или подсистеме; на третьем (верхнем) – центральный пункт управления и сбора измерительной информации (ЦПУиСИИ), управляющий ее обменом между концентраторами и устройствами окончательной обработки информации. В работах [6, 7] в качестве концентраторов предлагается использовать так называемые моты, которые осуществляют сбор информации с небольшого числа датчиков и производят обмен этой информацией между ними и ЦПУиСИИ. Но применение таких систем на борту ЛА не всегда возможно из-за сложности организации обмена информацией по РК, так как система вынуждена различать сигналы, исходящие от большого числа мотов, что является крайне сложной задачей, особенно в условиях действия помех большой интенсивности. Управление режимами сбора информации и основная обработка получаемых данных от концентраторов осуществляется специальным программным обеспечением ЦПУиСИИ. Такая структура сети позволит организовать централизованное управление режимами сбора данных в процессе испытаний и эксплуатации ЛА, осуществить бесперебойный сбор данных с заданной частотой измерений, оперативно обработать и отобразить данные в реальном времени.

На рис. 1 показана архитектура предлагаемой иерархической модульной распределенной ИИС-ИУС.

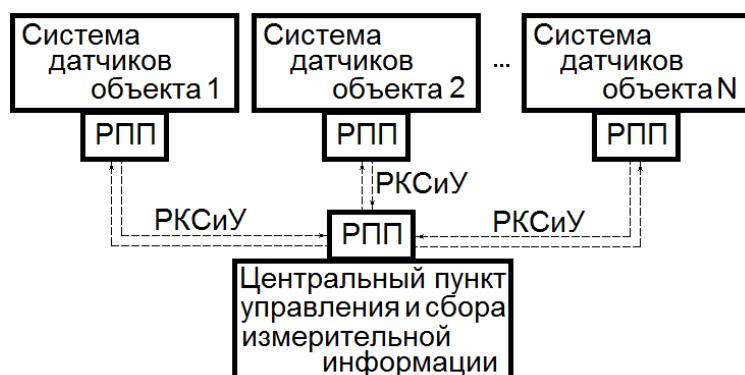


Рисунок 1 – Архитектура распределенной системы датчиков:
РПП – радиоприемопередатчик; РКСиУ – РК связи и управления

Система датчиков каждого из N объектов (контролируемых узлов ЛА) имеет автономное питание и управляющий контроллер, который связан с ЦПУиСИИ по РК, для чего все объекты снабжаются РПП. ЦПУиСИИ поочередно опрашивает системы датчиков и получает информацию о значениях измеряемых параметров каждого объекта.

При этом, очевидно, передача информации должна быть адресной. Рассмотрим возможные принципы формирования адресов датчиков (принципы выбора адреса).

1. Одноступенчатый принцип выбора адреса.

Этот принцип предполагает, что адрес датчика, передающего информацию, формируется непосредственно, как говорят, в одну ступень. Другими словами, для передачи N_d возможных адресов датчиков необходимо синтезировать N_d различных кодовых адресных слов. Считая, что для передачи информации используется двоичный код, найдем число m_{N_d} информационных разрядов кода адреса как $m_{N_d} \geq \log N_d$ или, учитывая, что число разрядов – всегда целое число, будем иметь $m_{N_d} = [\log N_d]$ где $[\bullet]$ – большее целое приближение.

После выдачи в РК адресной информации осуществляется передача самой информации от датчика.

2. Двухступенчатый принцип выбора адреса.

При этом принципе выбор адреса осуществляется в две ступени. Условно считается, что все датчики гипотетически объединены в ряд групп по некоторому их количеству в каждой группе. Представим число N_d в виде произведения условного числа P групп датчиков и условного числа L датчиков в группе: $N_d = PL$. Очевидно, что для формирования адреса датчика необходимо сформировать код выбора номера p группы ($p=1, 2, \dots, P$) – первая адресная ступень, а затем код выбора номера l датчика в группе ($l=1, 2, \dots, L$) – вторая адресная ступень. Отсюда следует, что для формирования адреса датчика достаточно синтезировать P различных кодовых слов выбора номера группы датчиков и L кодовых слов выбора номера датчика в группе.

Как показывает анализ, при формировании двоичных корректирующих кодов должен использоваться комбинационно-распределительный принцип избиения, при котором каждое кодовое слово представляет собой комбинацию состояний всех распределенных по времени элементов (разрядов) кода. В этом случае для оптимизации кода должно выполняться условие: $P=L \equiv \sqrt{N_d}$.

При выполнении этого условия кодовые таблицы номеров групп датчиков и номеров датчиков в группах становятся таблицами одинаковой емкости, следовательно, учитывая последовательный режим формирования в РК сигналов каждой адресной ступени, и сами кодовые слова в кодовых таблицах могут быть одинаковыми. Таким образом, для формирования кодов адресов датчиков реально необходимо иметь не $P+L$ различных кодовых слов, как кажется логичным, а только $P = L$, так как на каждой адресной ступени могут быть использованы одни и те же кодовые слова, что существенно упрощает алгоритмы кодирования-декодирования и их реализацию.

На практике, так как $\sqrt{N_d}$ чаще всего представляет собой дробное число, при расчете рекомендуется вместо числа N_d брать ближайшее большее число, представляющее собой полный квадрат, или выбирать значения параметров P и L так, чтобы выполнялось условие: $[\log P] = [\log L]$. В этом случае значения чисел информационных разрядов $m_P = [\log P]$ кода выбора номера группы и $m_L = [\log L]$ кода выбора номера объекта в группе становятся равными, что с практической точки зрения оптимально для процедур кодирования корректирующим кодом. Как следствие, кодирующие и декодирующие устройства отдельных адресных ступеней могут быть построены по модульному принципу при полной их соответствующей взаимозаменяемости, что важно с конструкторско-технологической точки зрения и с точки зрения надежности, как информационной, так и аппаратно-программной.

Сравнивая рассмотренные принципы выбора адреса датчиков, следует заметить, что при двухступенчатом принципе, так как каждая ступень кодирования автономна, а сигналы кодовых адресов ступеней формируются в РК последовательно, возрастает помехоустойчивость передачи. Действительно, пусть используется некоторый корректирующий код со значением минимального кодового расстояния, равным $d_{min} \geq r+s+e+1$ (r и s – кратности обнаружения и исправления ошибок трансформации, соответственно; e – кратность исправления ошибок стирания). Тогда каждая кодовая адресная ступень будет обладать помехоустойчивостью, определяемой значением d_{min} , следовательно, реально корректирующая способность при передаче сигналов кодов адресных ступеней будет вдвое выше, чем при одноступенчатом принципе выбора.

Таким образом, при достаточно большом числе $N_{\text{д}}$ датчиков предпочтительнее применение двухступенчатого принципа выбора адреса.

Сделаем еще одно замечание. Полученный вывод справедлив, если приемник информации, формируемой датчиками и транслируемой РК, – один и территориально находится в одном месте на борту ЛА. Если же алгоритмы работы системы предполагают наличие нескольких территориально разобщенных приемников информации, то следует рассмотреть еще один принцип выбора адреса.

3. Трехступенчатый принцип выбора адреса.

Пусть число разнесенных приемников в системе равно $N_{\text{пр}}$. Одновременно будем считать, что в соответствии с алгоритмами управления каждый приемник должен получать информацию от отдельных, не пересекающихся (условно – «своих») датчиков. И пусть для простоты число таких «своих» датчиков для каждого из $N_{\text{пр}}$ приемников одинаково. При такой постановке задачи необходимо сгруппировать датчики по признаку «своего» приемника. Число $N_{\text{напр}}$ датчиков по каждому направлению, соответствующему «своему» приемнику, определится как $N_{\text{напр}} = N_{\text{д}} / N_{\text{пр}}$.

Тогда для формирования адреса датчика следует на первой адресной ступени указать номер $q_{\text{н}}$ направления ($q_{\text{н}} = 1, 2, \dots, N_{\text{пр}}$), на второй ступени – номер $p_{q_{\text{н}}}$ группы датчиков направления $q_{\text{н}}$, на третьей ступени – номер $l_{q_{\text{н}}}$ датчика в группе $p_{q_{\text{н}}}$ ($p_{q_{\text{н}}} = 1, 2, \dots, P_{q_{\text{н}}}$; $l_{q_{\text{н}}} = 1, 2, \dots, L_{q_{\text{н}}}$). Значения параметров $P_{q_{\text{н}}}$ и $L_{q_{\text{н}}}$ определяются, как было описано выше для параметров P и L при двухступенчатом принципе выбора адреса, с заменой в ранее приведенных формулах параметра $N_{\text{д}}$ на параметр $N_{\text{напр}}$.

Как и при двухступенчатом принципе выбора адреса, при трехступенчатом принципе обеспечивается повышенная корректирующая способность кода в РК, в частности втрое большая, чем при одноступенчатом принципе выбора адреса.

В случаях, когда какие-то датчики должны работать одновременно на разные приемники, они (датчики) включаются изначально в несколько направлений.

Следует заметить, что, если на этапе разработки системы возможны различные варианты выбора числа приемников получения информации от датчиков, то при трехступенчатом принципе выбора адреса оптимальным, с точки зрения реализации алгоритмов кодирования-декодирования, является одинаковая информационная емкость каждой адресной ступени, равная ориентировочно $\sqrt[3]{N_{\text{д}}}$.

Исходя из практических соображений, с учетом реальной топологии размещения датчиков на борту ЛА, для минимизации длины линий связи от датчиков до блоков концентраторов, можно рекомендовать организацию групп датчиков по кустовому принципу. При этом каждый куст (группа датчиков) работает на свой концентратор.

В предыдущих работах [4, 8] авторы предложили идею использования петли переменного тока в качестве формирователя сигналов системы датчиков (любой физической природы), производящих сбор информации о том или ином узле ЛА. Были показаны преимущества такого подхода, главными из которых являются независимость откликов датчиков от сопротивлений соединительных проводов, линейность передаточной характеристики формирователя и высокая чувствительность схемы, которая примерно вдвое выше чувствительности традиционно используемых мостовых схем формирования сигналов датчиков.

Топология формирователя сигналов с использованием петли переменного тока системы интеллектуальных датчиков (ИД), снимающих измерительную информацию с некоторого узла (объекта) с номером i ($i = 1, 2, \dots, N$), показана на рис. 2.

Назначение управляющего контроллера – управление процессом съема информации с каждого ИД, используемого на объекте, предварительная ее обработка и передача оценок измеряемых параметров в цифровой форме на ЦПУиСИИ своим РПП.

Число K датчиков для каждого объекта может быть различным. ИД имеют собственные полные сопротивления (импедансы) Z_k , природа которых может быть различной (чисто резистивная, емкостная, индуктивная, а также смешанная). Для измерения в широком диапазоне температур, что характерно для авиационно-космической техники, ИД должны быть предварительно

откалиброваны. Поэтому среди датчиков, расположенных на объекте, могут быть и датчики температуры (например, резистивные датчики).

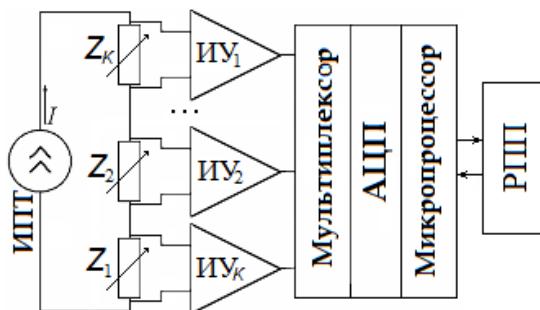


Рис. 2. Топология системы ИД, установленных на объекте i : ИУ – измерительные операционные усилители; ИПТ – источник переменного тока; РПП – радиоприемопередатчик; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

3. Математическая модель сигналов датчиков, включенных в токовую петлю

Будем полагать, что ИУ не являются прецизионными (с целью сокращения стоимости всей системы в целом), поэтому у них может быть «дрейф нуля». Кроме того, источник переменного тока тоже выбирается относительно не дорогим, поэтому стабильность его частоты не может быть гарантирована. Тем не менее, предполагается, что в течение одного цикла измерения выходных сигналов ИД частота источника и смещение нуля ИУ остаются постоянными, но их значения точно не известны.

После дискретизации сигналов с выходов ИД вся последующая обработка с целью получения оценок неизвестных измеряемых физических величин производится микропроцессором. Поэтому математическая модель выходного сигнала k -го датчика у i -го объекта распределенной системы после процедуры оцифровки может быть записана в виде:

$$u_{ikj} = A_{ik} \sin[2\pi(f_{0i} + \nu_i)t_{kj} + \varphi_{ik}] + B_{ik} + \xi_{ikj}, \\ i=1,2,\dots,N; k=1,2,\dots,K; j=1,2,\dots,M, \quad (1)$$

где: A_{ik} и φ_{ik} – неизвестные амплитуда и фаза сигнала в k -м канале i -го объекта, подлежащие оценке; ν_i – малая неизвестная флуктуация центральной частоты f_{0i} ИПТ у i -го объекта, возникающая из-за возможной его нестабильности; B_{ik} – постоянное смещение, необходимое для положительности оцифровываемого сигнала в АЦП, но не известное из-за возможного «дрейфа нуля» ИУ; ξ_{ikj} – случайная погрешность измерения напряжения у k -о канала i -й системы в момент времени t_{kj} , возникающая из-за влияния тепловых шумов усилителей и других факторов и предполагаемая нормально распределенной с нулевым математическим ожиданием и неизвестной дисперсией.

Для сокращения записей в дальнейшем опустим индекс объекта i , предполагая, что подобные операции проводятся для всех N объектов.

Величина ν считается очень малой по сравнению с f_0 ($|\nu/f_0| \leq 0,01$), потому что стабильность частоты современных недорогих отечественных генераторов тока не хуже 1 %. При этом моменты взятия выборок в разных каналах t_{kj} и t_{mj} не равны между собой для различных каналов ($k \neq m$).

При сделанных допущениях система уравнений (1) должна быть решена относительно параметров A_k , φ_k , B_k и ν . Всего в ней $3K+1$ неизвестных.

Если общее время измерений не превышает нескольких периодов (2-3 периода) тока, питающего петлю, то величина $\nu N \tau \leq 0,15$ (где $\tau = t_{kj} - t_{k(j-1)}$ – период дискретизации сигналов в АЦП). В этом случае синус и косинус малого аргумента νt_{kj} могут быть приближенно равны: $\sin \nu t_{kj} \approx \nu t_{kj}$ и $\cos \nu t_{kj} \approx 1$. Тогда после раскрытия скобок в (1) система может быть переписана в виде:

$$u_{kj} \approx A_k \sin(2\pi f_0 t_{kj}) \cdot \cos \varphi_k + A_k 2\pi \nu t_{kj} \cos(2\pi f_0 t_{kj}) \cdot \cos \varphi_k + A_k \cos(2\pi f_0 t_{kj}) \sin \varphi_k - \\ - A_k 2\pi \nu t_{kj} \sin(2\pi f_0 t_{kj}) \cdot \cos \varphi_k + B_k + \xi_{kj}, \quad k=1,2,\dots,K; j=1,2,\dots,M. \quad (2)$$

Следующая замена переменных

$$\begin{cases} q_{1k} = A_k \cos \varphi_k, \\ q_{2k} = A_k \nu \cos \varphi_k, \\ q_{3k} = A_k \sin \varphi_k, \\ q_{4k} = A_k \nu \sin \varphi_k, \\ q_{5k} = B_k, \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} x_{1kj} = \sin 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{2kj} = 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{3kj} = \cos 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{4kj} = -2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{5kj} = 1; \end{cases} \quad k=1,2,\dots,K; j=1,2,\dots,M; \quad (3)$$

делает систему (2) линейной относительно новых неизвестных $\mathbf{q} = (q_{11}, \dots, q_{51}, \dots, q_{1K}, \dots, q_{5K})^T$ (T обозначает транспонирование матрицы):

$$u_{kj} = \sum_{m=1}^5 q_{mk} x_{mkj} + \xi_{kj}, \quad k=1,2,\dots,K; j=1,2,\dots,M \quad (4)$$

Как следует из (3) и (4), общее число неизвестных q_{mk} равно $5K$. Следовательно, число измерений напряжения в каждом канале должно быть не меньше этой величины ($M \geq 5K$), но для повышения точности оценивания желательно выбрать M в несколько раз большим, чем $5K$. Допустим, число датчиков на конкретном i -м объекте равно 15, а частота ИПТ $f_0 = 20$ кГц, тогда цикл измерений должен составлять не более двух периодов этого сигнала $T = 0,1$ мс. За это время желательно сделать порядка 200 измерений напряжения в каждом канале. Поэтому частота дискретизации АЦП должна быть не менее 30 МГц, что вполне реально для отечественных электронных компонентов.

Однако с математической точки зрения должны существовать $2K-1$ билинейных уравнений связи на эти переменные q_{mk} , которые легко находятся из (3):

$$q_{1k} q_{4k} = q_{2k} q_{3k}; \quad \nu = q_{2k}/q_{1k}; \quad k=1,2,\dots,K. \quad (5)$$

На самом деле, можно найти много уравнений связи для переменных q_{mk} , но только $2K-1$ из них будут независимыми. Поэтому выбраны именно соотношения (5).

4. Оценка неизвестных параметров модели по методу максимального правдоподобия

При сделанных допущениях относительно погрешностей измерения ξ_{kj} оптимальные оценки неизвестных параметров \mathbf{q} могут быть получены путем решения линейной системы уравнений (4) по методу максимального правдоподобия (ММП) [9] с учетом билинейных ограничений (5). Но поскольку в целом эта задача нелинейная, то выписать ее решение в явном виде не представляется возможным.

Стандартный метод решения, предложенный в [10] и использованный в [4, 8], позволяет предложить итерационный алгоритм решения задачи (4), (5). Он основан на естественном предположении, что погрешности ξ_{kj} по абсолютной величине существенно меньше, чем значения сигнала u_{kj} ($|\xi_{kj}| \ll u_{kj}$). Тогда нелинейные ограничения (5) можно разложить в ряд Тейлора в окрестности нулевого приближения решения, ограничившись при этом линейными членами. Поэтому на первом этапе решения ограничения (5) не учитываются, и линейная система (4) решается по ММП. В этом случае решение, которое выбирается в качестве нулевого приближения, совпадает с решением по методу наименьших квадратов:

$$\mathbf{q}_0 = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{V}), \quad (6)$$

где $^{-1}$ обозначает нахождение обратной матрицы. После этого задача (4), (5) может быть решена с помощью метода множителей Лагранжа [4, 8]:

$$\mathbf{q}_{m+1} = \mathbf{q}_m - \frac{\mathbf{q}_m^T \mathbf{G} \mathbf{q}_m}{2 \mathbf{q}_m^T \mathbf{G} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{G} \mathbf{q}_m} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{q}_m, \quad (7)$$

где m – порядковый номер итерации, а блочные матрицы \mathbf{X} и \mathbf{G} задаются следующими выражениями:

$$X = \begin{pmatrix} W_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_K \end{pmatrix}; \quad G = \begin{pmatrix} H & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} \\ G_{21} & H & 0 & 0 & 0 \\ G_{31} & 0 & H & 0 & 0 \\ G_{41} & 0 & 0 & H & 0 \\ G_{51} & 0 & 0 & 0 & H \end{pmatrix}; \quad W_k = \begin{pmatrix} x_{11k} & x_{21k} & x_{31k} & x_{41k} & x_{51k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1Mk} & x_{2Mk} & x_{3Mk} & x_{4Mk} & x_{5Mk} \end{pmatrix};$$

$$G_{12} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}; \quad G_{21} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}; \quad G_{14} = \begin{pmatrix} -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}; \quad G_{13} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix};$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad G_{31} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}; \quad G_{41} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots \\ 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \dots \end{pmatrix}; \quad G_{15} = \begin{pmatrix} -1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}; \quad G_{51} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots \end{pmatrix}.$$

Все матрицы G_{ln} имеют одинаковые размеры ($K \times K$), причем в каждой матрице – только по два ненулевых элемента. Все непоказанные элементы этих матриц равны нулю.

Как указано в работах [8, 10], сходимость предлагаемого алгоритма очень высокая (как правило, не требуется более 2-3 итераций).

После нахождения оценок промежуточных неизвестных \mathbf{q} достаточно просто вычислить оценки искомых параметров модели (1), подставив значения этих оценок в (3):

$$\hat{\nu} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{\hat{q}_{2k}}{\hat{q}_{1k}} + \frac{\hat{q}_{4k}}{\hat{q}_{3k}} \right), \quad \hat{A}_k = \sqrt{\hat{q}_{1k}^2 + \hat{q}_{3k}^2},$$

$$\hat{\phi}_k = \begin{cases} \alpha_k, & \hat{q}_{1k} \geq 0, \hat{q}_{3k} \geq 0; \\ \alpha_k + \pi, & \hat{q}_{1k} < 0; \\ \alpha_k + 2\pi, & \hat{q}_{1k} > 0, \hat{q}_{3k} < 0, \quad 0 \leq \hat{\phi}_k \leq 2\pi, \quad \alpha_k = \arctg(\hat{q}_{3k} / \hat{q}_{1k}) \end{cases}. \quad (8)$$

Зная из (8) оценки амплитуд и фаз сигналов с выходов всех датчиков, можно определить значения измеряемых физических величин, которые характеризуют исследуемый объект.

Использование предлагаемого формирователя сигналов в сочетании с описанной процедурой оценивания параметров датчиков позволяет существенно снизить требования к идентичности используемых чувствительных элементов, включенных в токовую петлю (что является обязательным, например, для мостовых формирователей сигнала). Более того, стабильность частоты ИПТ может не соблюдаться, потому что возможные колебания частоты учитываются описанной моделью. Таким образом, стоимость системы датчиков, используемых для сбора информации с какого-либо объекта (узла) ЛА может быть значительно уменьшена.

5. Заключение

В работе описана архитектура распределенной системы сбора информации, основанная на использовании системы ИД и предназначенная для применения в ЛА гражданского назначения. Система строится по модульному иерархическому принципу. На нижнем уровне используются системы датчиков, обслуживающих конкретные узлы или подсистему ЛА. Все датчики, собирающие информацию с одного узла, соединены по проводным каналам с одним концентратором, совокупность которых представляет собой второй (средний) уровень распределенной системы. Концентраторы осуществляют обмен полученными от датчиков и предварительно обработанными данными по беспроводному РК с ЦПУиСИИ, находящимся на третьем (верхнем) уровне.

Предложено использовать новый формирователь сигнала ИД в форме петли переменного тока и показаны его достоинства по сравнению с мостовыми формирователями. Описана процедура оценивания неизвестных параметров модели ИД, включенных в токовую петлю, основанная на решении системы уравнений по ММП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tian, G.Y. Design and Implementation of Distributed Measurement Systems Using Fieldbus-Based Intelligent Sensors / G.Y. Tian // IEEE Trans. IM, Vol. 50, No. 5, 2001.
2. Куатов, Б.Ж. Комплексные показатели надежности авиационной техники / Б.Ж. Куатов, А.Б. Кусаинов, Е.А. Сулейменов, Д.Х. Нуржанов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: Т78 в 2 т. / под.ред. Н.К. Юркова. - Пенза : ПГУ, 2016. – 1 том – С. 253-257.
3. Писарев, В.Н. К вопросу о стандартизации в области надежности военной техники / В.Н. Писарев // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: Т78 в 2 т. / под.ред. Н.К. Юркова. - Пенза : ПГУ, 2016. – 1 том – С. 293-295.
4. L'vov, A.A. The use of current loop circuit as a signal conditioner for high accuracy digital piezoresistive pressure sensors / A.A. L'vov, P.A. L'vov, R.S. Konovalov, S.A. Kuzin // X Internat. Scien. & Techn. Conf. "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines". Proceed. Omsk: Omsk State Technical University, Russia, 2016.
5. Сергиевский, М.В. Использование беспроводных сенсорных сетей для сбора, передачи и обработки информации в системах мониторинга состояния объектов / М.В. Сергиевский, С.Н. Сыроежкин // Cloud of Science. 2016. Т. 3. № 1. – С.125-136.
6. Bauer, P. The mobile patient: wireless distributed sensor networks for patient monitoring and care / P. Bauer, M. Sichitiu, R. Istepanian, K. Premaratne // Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine, 2000, pp. 17–21.
7. Sergievskiy, M.V. The Use of Wireless Sensor Technologies for Condition Monitoring of Modern Aircraft Structures / M.V. Sergievskiy, S.N. Syroezhkin // Modern Applied Science; Vol. 9, No. 8; 2015, P. 266-269.
8. L'vov, A. P Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing / A. L'vov, P. L'vov, R. Konovalov // Proceed. of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf., 2016, St. Petersburg, Russia, P. 279-282.
9. Линник, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 334 с.
10. Репин, В.Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.

Кленов Дмитрий Викторович (1), Львов Алексей Арленович (1),
Львов Пётр Алексеевич (2), Светлов Михаил Семенович (3),
Светлова Марина Константиновна (1)

1. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
2. Энгельсское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глушарева
3. Институт проблем точной механики и управления РАН

ИНФОРМАЦИОННЫЙ КАНАЛ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы построения информационных каналов повышенной информационной надежности как структурного элемента распределенной интеллектуальной цифровой системы передачи информации, осуществляющего процедуры кодирования, декодирования и приемопередачи в беспроводных бортовых информационно-управляющих и информационно-измерительных системах. Предложен вариант структуры такого канала с двухкаскадными кодеками, работающими с использованием в первом каскаде кодирования, в общем случае, К-ичного корректирующего группового кода, обнаруживающего и/или исправляющего ошибки трансформации и/или стирания, а во втором каскаде – двоичного кода с кодовым сигнальным признаком, реализуемом на базе многоотводных линий задержки. Приведено аналитическое описание алгоритмов кодирования и декодирования для кода с кодовым сигнальным признаком.

Ключевые слова: информационный канал, кодирование, декодирование, кодеки, кодовый сигнальный признак, многоотводная линия задержки.

Annotation. The article describes the construction of information channels with increased information reliability which serves as a structural element of distributed intelligent digital information transmission systems carrying out the procedure of data encoding, decoding, transmission and reception in wireless onboard information-control and information-measuring systems. The work suggests the usage of two-cascade channel. The first cascade codec uses K-ary primary code and is capable to detect and correct transformation and/or erasure errors. The second cascade codec applies binary code with code signal feature implemented using distributor with multidrop delay lines. The analytical description of the encoding and decoding algorithms for the code with code signal feature is given.

Keywords: Information channel, encoding, decoding, codec, code signal feature, multidrop delay line.

1. Введение

Обеспечение надежной и качественной работы информационно-управляющих и информационно-измерительных систем (ИУС и ИИС) летательных аппаратов (ЛА) – актуальная задача, не только требующая создания высокоточных и надежных приборов с повышенными техническими характеристиками, но и разработки распределенной интеллектуальной цифровой системы передачи информации (ЦСПИ), способной осуществлять достоверный информационный обмен между элементами ИУС-ИИС [1, 2]. В этом смысле, главная проблема создания такой ЦСПИ, обеспечивающей требуемые показатели работоспособности, в первую очередь, по помехоустойчивости и помехозащищенности, при помехах различной физической природы, возникающих на борту ЛА, состоит в синтезе информационного канала (ИК) повышенной информационной надежности, способного работать в условиях действия помех большой интенсивности [3]. ИК рассматривается как некоторая обобщенная структура, содержащая кодирующие (КУ) и декодирующие (ДКУ) устройства на базе кодеров (КД) и декодеров (ДК), а также каналы связи (КС) как совокупность канальной аппаратуры (КА) и линий связи (ЛС) [4]. В беспроводных системах КА представляет собой радиоприемопередающие устройства (РПУ).

Известны многочисленные способы и методы повышения помехоустойчивости ИК. Это использование корректирующих кодов, скремблирование, байтовые и битовые перемежения,

дублирование передачи и др. Однако их применение ведет к существенному усложнению алгоритмов кодирования и декодирования и, как результат, к росту аппаратно-программных затрат. Следует заметить также, что при этом практически не повышается уровень надежности синхронизации в ИК с последовательным синхронным интерфейсом, что во многом нивелирует предпринимаемые меры по увеличению помехоустойчивости указанными методами. Анализ проблем информационной надежности таких ИК при большой интенсивности помех в КС позволяет утверждать, что одним из наиболее радикальных способов повышения помехоустойчивости с одновременным решением вопросов синхронизации является вариант ИК с двухкаскадными кодеками (КДК): КДК первичного кода (ПК) и КДК вторичного кода (ВК). Эти КДК в своих составах содержат КД-ДК ПК и КД-ДК ВК, соответственно. ПК представляет собой, как правило, корректирующий код, а ВК строится на базе кодового сигнального признака (КСП) [5], т.е. в целом рассматривается структура ИК, приведенная на рис. 1.

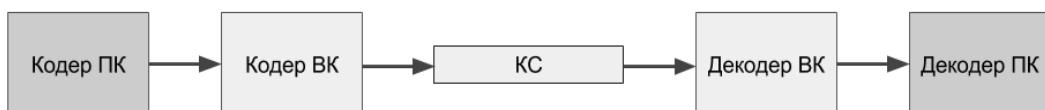


Рисунок 1 – Структура ИК с двухкаскадными кодеками

2. Анализ и принципы построения кодирующего устройства первичного кода

Будем считать, что выходные сигналы АЦП, поступающие в КУ ИК, соответствуют кодам номеров уровней квантования аналоговых сигналов датчиков, число которых определяется их точностью и разрешающей способностью. Вообще говоря, именно эти сигналы и подлежат передаче по КС ИУС-ИИС как полезная рабочая информация. Для определенности будем считать, что АЦП формирует m_I -разрядный код, не избыточный и который в непосредственном виде не может быть передан по КС с помехами из-за его крайне низкой помехоустойчивости. Это вызывает необходимость преобразования m_I -разрядного, как правило, параллельного двоичного кода АЦП в помехоустойчивый (избыточный) n_I -разрядный последовательный код, в котором $n_I = m_I + k_I$, где k_I – число контрольных (избыточных) разрядов, соответствующих m_I -разрядному коду АЦП. Таким образом, ПК представляет собой n_I -разрядный последовательный двоичный корректирующий код, способный обнаруживать и/или исправлять ошибки, возникающие в нем под воздействием помех в КС. ПК формируется в КУ ПК с помощью специальных программно-аппаратных средств.

Структурно КУ ПК содержит два основных устройства: КД_{m_I} – кодер m_I – формирователь m_I -разрядного двоичного последовательного кода (информационной части ПК) и КД_{k_I} – кодер k_I – формирователь k_I контрольных разрядов выбранного корректирующего кода (контрольной части ПК).

Отметим некоторые соображения по выбору ПК.

Как известно, корректирующие свойства ПК, в первую очередь, определяются его избыточностью [6]. Количественно избыточность ПК характеризует коэффициент избыточности $R_I = k_I / n_I = (n_I - m_I) / n_I = 1 - m_I / n_I$. На практике при выборе и расчете кода в качестве характеристики корректирующей способности кода чаще используется минимальное кодовое расстояние d_{min} . Как показывает анализ помех, возникающих на борту ЛА, при беспроводных КС [7] принципиальное значение имеют электростатические наводки, электромагнитные импульсные помехи от электроаппаратуры на борту, многолучевость при приеме отраженных сигналов и межсимвольная интерференция, помехи соседних РПУ при их параллельной работе. Методы кодирования, рекомендуемые для таких каналов, достаточно хорошо известны.

Анализ наиболее распространенных корректирующих кодов, обнаруживающих и/или исправляющих ошибки трансформации и/или стирания, с различными значениями коэффициента избыточности и минимального кодового расстояния позволяет сделать следующие выводы.

Существующие стандарты на форматы и структуры кодов в ИУС и ИИС, в том числе с беспроводными КС, устанавливают так называемую байтовую кодовую структуру. Это объясняется рядом факторов, в том числе и удобством реализации на современной элементной базе

с

учетом алгоритмических особенностей процедур обработки цифровых сигналов. При этом, как правило, все алгоритмы предполагают последовательную побайтовую обработку сигналов, в первую очередь, при декодировании информации. Одновременно следует учитывать, что используемые как наиболее употребительные групповые коды являются систематическими кодами, что позволяет формировать их структуру так, чтобы всегда сначала осуществлялась обработка сигналов информационной части кода, а вслед за ней – контрольной части кода.

При большом объеме передаваемой информации, когда значения чисел информационных и контрольных разрядов велики, тем не менее, надо учитывать, что число контрольных разрядов (байтов) существенно меньше числа информационных разрядов (байтов). Другими словами, коэффициент избыточности имеет относительно небольшие значения, несмотря на реализацию корректирующих кодов с исправлением ошибок. Так, например, в современных цифровых системах телерадиовещания, сотовой связи, управления подвижными объектами, в том числе ответственными, при использовании кодов БЧХ обеспечивается кодовая избыточность с коэффициентом избыточности $R < 0,1$ (в соответствии с рекомендациями стандартов цифрового телерадиовещания $R = 0,0784$) при том, что допустимое значение вероятности ложного приема (вероятности трансформации сообщений) в этих системах должно быть $P_{\text{л.пр.}} = P_{\text{тр.}} < 10^{-8}$, а в особых случаях (в системах категории I по достоверности передачи) от 10^{-12} до значений порядка 10^{-14} для систем телеуправления. Для систем телеметрии эти же стандарты устанавливают допустимые значения вероятности трансформации сообщений примерно на 3-4 порядка ниже.

Таким образом, можно утверждать, что в большинстве случаев в качестве ПК может быть предложен групповой код (циклический, Хемминга, БЧХ) со значением $d_{\min} \geq 3$. Однако, как показывает более детальный анализ, наиболее целесообразным является применение в качестве ПК двоичного группового кода со значением $d_{\min} = 4$. Такой код в режиме обнаружения ошибок трансформации обеспечивает кратность обнаружения $r=3$, а при режиме исправления ошибок трансформации – кратность исправления $s=1$. В режиме обнаружения и исправления ошибок трансформации обеспечивается кратность обнаружения $r=2$ и одновременно кратность исправления $s=1$. В каналах с ошибками стирания можно обеспечить кратность исправления ошибок стирания $e=3$. Если рассматривается канал с ошибками и трансформации, и стирания, то возможны варианты: обнаружение ошибок трансформации кратности $r=2$ при одновременном исправлении ошибок стирания кратности $e=1$ или обнаружение ошибок трансформации кратности $r=1$ при одновременном исправлении ошибок стирания кратности $e=2$. В режиме только исправления ошибок обеспечивается одновременное исправление ошибок трансформации и стирания кратностей $s=e=1$.

При синтезе кода с $d_{\min} = 4$ (группового, Хемминга, квазициклического) для однобайтового кодового слова могут быть получены параметры структуры

$m_1 = k_1 = 4$ с информационной емкостью 16 сообщений.

Если в системе используются 12-разрядные АЦП, то 12-разрядный выходной код АЦП, рассматриваемый как m_1 АЦП, должен быть преобразован в k_1 в три 4-разрядных информационных кодовых слова m_1, m_2, m_3 , каждое из которых записывается как полубайтовая структура.

В результате выполнения процедуры кодирования в k_1 формируются три 4-разрядных контрольных кодовых слова k_1, k_2, k_3 отдельно для m_1, m_2, m_3 , соответственно, также в виде полубайтовых структур. Таким образом, в КУ ПК формируются три байтовых слова корректирующего ПК: $A_{\text{ПК}1} \rightarrow m_1 k_1; A_{\text{ПК}2} \rightarrow m_2 k_2; A_{\text{ПК}3} \rightarrow m_3 k_3$.

Трехбайтовое кодовое слово, составленное из кодовых слов $A_{\text{ПК}1}, A_{\text{ПК}2}, A_{\text{ПК}3}$, представляющих в совокупности сформированный корректирующий код, отображает выходную информацию датчика, подлежащую передаче (информация об одном из уровней квантования выходного сигнала датчика).

Наиболее рациональным в качестве ПК выглядит двоичный групповой код $(n_1, m_1) \rightarrow (8,4)$.

Необходимо сделать еще одно важное замечание. Речь до сих пор шла лишь о двоичном ПК. Вместе с тем, известно, что при необходимости сократить длину кодовых последовательностей при больших объемах передаваемой информации, когда применение двоичного кода не ведет к

приемлемо хорошим результатам, рекомендуется синтезировать ПК с повышенным значением основания кодового алфавита. Другими словами, в общем случае ПК может быть построен K -ичный код с использованием символов $K_c=0 \div K-1$. При этом всегда (при прочих равных условиях) может быть обеспечен более высокий уровень помехоустойчивости. В этом смысле, особый интерес представляют K -ичные коды без использования нулевого сигнального признака, т.е. коды, кодовые слова которых содержат лишь токовые сигнальные признаки (символы) $K_T=1, 2, \dots, K-1$. Среди таких кодов важнейшими являются троичные коды, например, код Рида-Соломона, позволяющий получать высокие показатели по помехоустойчивости.

3. Анализ и принципы построения кодирующего устройства вторичного кода

Принцип использования ВК с КСП состоит в том, что каждый символ ПК представляется в виде n -разрядного двоичного кодового слова (n -разрядной двоичной последовательности) с фиксированными межразрядными (межсимвольными) расстояниями (задержками). На физическом уровне (в КС) сигнал передается как последовательность определенного количества рабочих импульсов, занимающих временные позиции, соответствующие по номерам единичным разрядным символам ВК и имеющие принципиально малые длительности τ . При этом первый рабочий импульс формируется с некоторой фиксированной начальной задержкой Δt_0 относительно поступления сигнала символа ПК на кодер ВК. Последующие рабочие импульсы формируются через интервалы времени, величины которых кратны некоторому значению времени задержки Δt . Как было показано в [3], для обеспечения высокого уровня помехоустойчивости значения величин задержек Δt_0 и Δt должны быть строго постоянными и одинаковыми для КД и ДК ВК. При этом должно выполняться условие: $\Delta t_0 \neq k \Delta t$, где $k \in N$. В общем случае, формирование j -го рабочего импульса происходит в момент времени

$$T_j = \Delta t_0 + (j-1)\Delta t, \quad 1 \leq j \leq n \quad (1)$$

после поступления импульса ПК на КУ ВК. А формирование всех импульсов завершается за время $T_A = \Delta t_0 + (n-1)\Delta t$. Для корректной работы КДК ВК должно выполняться неравенство $T_A \leq T_p$, где T_p – время передачи одного символа ПК.

Процедуры и алгоритмы кодирования и декодирования кода с КСП достаточно подробно исследованы, например, в [3].

В качестве информационной нагрузки для КУ ВК служат кодовые слова ПК. Так как в общем случае алфавит ПК – K -ичный, то его символы со значениями из диапазона $[0, K-1]$ можно пронумеровать от 1 до K . Поэтому под фразой "символ i " понимается символ с номером i и значением $i-1$.

Поставим в соответствие каждому символу i ПК некоторое двоичное кодовое слово A_i . Таким образом, получим набор из K кодовых слов ВК: $A = \{A_i\}_{i \in [1, K]}$. Дальнейшие рассуждения основаны на совокупности некоторых свойств этого набора. А именно, для каждого слова A_i верны следующие утверждения: 1) слово A_i имеет длину n , где $n \geq 5$; 2) слово A_i содержит ровно m_1 единичных разрядов, при этом $3 \leq m_1 \leq n-2$, что, в свою очередь, означает, что позиции единичных символов в слове могут быть занумерованы и обозначены через μ_{iu} , где $1 \leq u \leq m_1$, $1 \leq \mu_{iu} \leq n$; 3) слово A_i начинается и заканчивается единичным символом, т.е. $\mu_{i1} = 1$, $\mu_{im_1} = n$.

При физической передаче кодового слова A_i по КС, как указано выше, передаются только импульсы, соответствующие единичным символам слова A_i . Учитывая это, перепишем формулу (1), выражающую время передачи импульсов ВК в КС, оставляя только моменты передачи единичных импульсов:

$$T_{iu} = \Delta t_0 + (\mu_{iu} - 1)\Delta t, \quad 1 \leq u \leq m_1. \quad (2)$$

Пусть n_K – длина кодового слова ПК. Запишем это слово в виде $Q = q_1, q_2, \dots, q_{n_K}$, $1 \leq q_w \leq K$ для всех $1 \leq w \leq n_K$. Для остальных кодовых слов ПК рассуждения будут аналогичными.

Кодирование слова Q проводится посимвольно. Для этого каждый символ q_w сначала переводится в соответствующее ему кодовое слово A_{q_w} ВК, которое затем на физическом уровне передаётся набором импульсов, формируемых в моменты времени (2) (рис. 2)

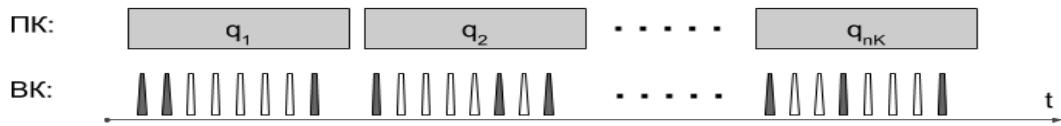


Рисунок 2 – Условное представление символов ПК в виде серий импульсов ВК

Представим процедуру кодирования аналитически. Назовем единичным вектором символа $i, 1 \leq i \leq K$, вектор I_i длины K , в котором все элементы равны 0, кроме элемента в позиции i , равного 1. Другими словами:

$$I_i = (\underbrace{0, 0, \dots, 0}_{i-1 \text{ позиций}}, 1, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{K-i \text{ позиций}}).$$

Для начала преобразуем входные данные, заменив каждый символ q_w ПК соответствующим ему единичным вектором I_{q_w} . Затем составим из полученных векторов матрицу Q , содержащую n_K строк и K столбцов:

$$Q = q_1, q_2, \dots, q_{n_K} \Rightarrow Q = \begin{pmatrix} I_{q_1} \\ I_{q_2} \\ \vdots \\ I_{q_{n_K}} \end{pmatrix}.$$

Составим матрицу кодовых слов A , i -я строка которой представляет собой кодовое слово A_i , записанное в виде вектора. В результате получим матрицу, содержащую K строк и n столбцов:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{K1} & a_{K2} & \dots & a_{Kn} \end{pmatrix}.$$

Для проведения операции кодирования перемножим матрицы Q и A

$$B = Q \cdot A = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n_K,1} & b_{n_K,2} & \dots & b_{n_K,n} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где элемент b_{wj} матрицы B определяется по формуле:

$$b_{wj} = \sum_{i=1}^K I_{q_w i} a_{ij} = a_{q_w j}. \quad (4)$$

Последний переход в (4) возможен по определению единичного вектора – в I_{q_w} только элемент $I_{q_w q_w}$ является ненулевым.

Каждая строка в матрице B представляет собой результат кодирования одного символа ПК – соответствующее ему кодовое слово. Передача матрицы B в КС проводится построчно (последовательно с первой строки по последнюю).

Формула (3) по структуре схожа с формулой кодирования для групповых кодов, причем матрица кодовых слов A играет роль образующей матрицы G группового кода, хотя полного

соответствия этих формул нет, т.к. по построению код с КСП является комбинаторным кодом с постоянным весом и не относится к классу алгебраических.

4. Анализ и принципы построения декодирующего устройства вторичного кода

Будем считать, что в КС действуют аддитивные помехи, которые подчиняются закону распределения Пуассона. Обозначим через p_{10} и p_{01} вероятности трансформации единичного символа в ноль и нуля в единицу, соответственно. Амплитуды помех могут быть различными. Однако, чтобы итоговый сигнал, полученный после наложения помехи на кодовый импульс, был воспринят в ДКУ как единичный символ, его амплитуда должна быть выше некоторого порогового значения h порогового устройства первой решающей схемы ДКУ. Значение порогового параметра h должно подбираться так, чтобы минимизировать значение вероятности p_{10} . Это означает, что рассматривается КС, в котором $p_{10} \ll p_{01}$, но при этом вероятность p_{10} не может быть нулевой. В худшей ситуации такая трансформация также будет оказывать влияние на процесс декодирования. Однако этот случай является более сложным и должен обсуждаться отдельно. В рамках данной работы трансформация символа “1” в символ “0” не учитывается. Другими словами, пренебрегаем появлением «лишних» нулей, и дальне оценивается ситуация, когда в результате действия помех могут только появляться дополнительные единичные символы.

Будем использовать ДК ВК, как он описан в [3]. В [8] доказано, что код с КСП является самосинхронизирующимся, а физически формирование результата в ДКУ происходит в момент времени T_A после поступления на вход ДКУ ВК первого рабочего импульса последовательности (2) или в момент времени $T_B = T_A + \Delta t_0 = 2\Delta t_0 + (n-1)\Delta t$ после поступления сигнала соответствующего символа ПК в КУ ВК.

Аналитически процедуру декодирования удобно провести с использованием матрицы, каждая строка которой отвечает за декодирование одного символа ПК. Составим матрицу C принятых ДКУ значений символов. Для каждого символа q_w ПК в w -ю строчку матрицы C выпишем значения, образовавшиеся на соответствующих выходах ДК ВК в момент времени T_B после поступления сигнала символа q_w на вход КУ ВК. Размер полученной матрицы будет совпадать с размером матрицы $B : n_K$ строк и n столбцов.

При отсутствии помех в КС было бы верно равенство $C = B$, однако в случае наличия помех (тем более – помех большой интенсивности), будем иметь $C = B + E$, где E – матрица ошибок.

Декодируем результат – построим матрицу подобия S по формуле:

$$S = C \cdot A^T = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n_K,1} & c_{n_K,2} & \dots & c_{n_K,n} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_{11} & a_{22} & \dots & a_{K1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{K2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{Kn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1K} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n_K,1} & s_{n_K,2} & \dots & s_{n_K,K} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где элемент s_{wi} вычисляется по формуле:

$$s_{wi} = \sum_{j=1}^n c_{wj} a_{ij}. \quad (6)$$

Операция умножения матриц в (5) проводится над полем целых чисел \mathbb{Z} , в то время как все операции до этого проводились над полем \mathbb{Z}_2 . Таким образом, в общем случае матрица S – недвоичная.

Матрица S содержит n_K строк и K столбцов. Обозначим ее строки через S_w , $1 \leq w \leq n_K$. Далее с матрицей S необходимо работать построчно. Стока S_w отвечает за декодирование

символа q_w слова Q , а каждый ее элемент s_{wi} отражает степень соответствия полученного результата кодовому слову A_i , т.е. и символу i ПК. Точнее, значение параметра s_{wi} равно количеству единиц в S_w , совпавших с соответствующими единицами в A_i .

Отметим несколько свойств матрицы S .

1. $\forall w, i \quad s_{wi} \geq 2$. Действительно, из свойства 3) кодовых слов $a_{i1} = a_{in} = 1$. В свою очередь, отсюда по формуле (4) получим, что $b_{w1} = b_{wn} = a_{q_w1} = a_{q_wn} = 1$. Из предположения о свойствах КС ($p_{10} < p_{01}$) имеем аналогичную формулу для элементов матрицы C : $c_{w1} = c_{wn} = 1$. Оценим s_{wi} из формулы (6):

$$s_{wi} = \sum_{j=1}^n c_{wj} a_{ij} = c_{w1} a_{i1} + c_{wn} a_{in} + \sum_{j=2}^{n-1} c_{wj} a_{ij} \geq c_{w1} a_{i1} + c_{wn} a_{in} = 2.$$

2. $\forall w, i \quad s_{wi} \leq m_1$. Чтобы доказать эту оценку, воспользуемся свойством 2) кодовых слов и выпишем равенство (6) с учетом только единичных позиций:

$$s_{wi} = \sum_{j=1}^n c_{wj} a_{ij} = \sum_{u=1}^{m_1} c_{w\mu_{iu}} a_{i\mu_{iu}} = \sum_{u=1}^{m_1} c_{w\mu_{iu}} \leq m_1.$$

3. Для элемента s_{wq_w} в неравенстве из предыдущего свойства достигается строгое равенство, т.е. $s_{wq_w} = m_1$. Для доказательства воспользуемся формулами (6) и (4):

$$s_{wq_w} \stackrel{(6)}{=} \sum_{j=1}^n c_{wj} a_{q_w j} \geq \sum_{j=1}^n b_{wj} a_{q_w j} \stackrel{(4)}{=} \sum_{j=1}^n a_{q_w j} a_{q_w j} = m_1.$$

В сочетании с предыдущим неравенством это даст $s_{wq_w} = m_1$. Стоит заметить, что из-за действия помех данное равенство может быть достигнуто для произвольного s_{wi} .

Матрица S является аналогом синдрома групповых кодов. Она позволяет оценить влияние помех на передаваемую по КС информацию. Для финального декодирования строки C_w строится матрица результата R_w по формуле:

$$r_{wi} = \begin{cases} 1, & s_{wi} = m_1; \\ 0, & s_{wi} < m_1. \end{cases} \quad (7)$$

Проанализируем матрицу R построчно, воспользовавшись свойствами элементов S . Если в строке r_w встретилась только одна единица (обозначим ее столбец индексом i_0), то по свойству 3 можно сделать вывод, что $q_w = i_0$, следовательно, декодировался символ i_0 . Если в w -й строке оказалось две и более единиц, то это означает, что однозначное декодирование невозможно. В этом случае в ДК ВК должен быть сформирован сигнал защитного отказа, т.е. зафиксирован факт обнаружения ошибки. Физически защитный отказ в ДКУ может быть реализован через формирование символа, аналогичного символу стирания в канале с ошибками стирания, который затем обрабатывается в ДК ПК с целью исправления ошибки.

Отсутствие в w -й строке матрицы R единиц противоречит свойству 3 и теоретически не возможно. Однако, если на практике такое случилось, то можно утверждать о некорректной работе передающего или принимающего оборудования. В этом случае в ДК ВК также должен фиксироваться факт защитного отказа.

Как было отмечено в предыдущих работах авторов, КДК ВК строится с использованием распределительного устройства на базе многоотводных линий задержки (МЛЗ). Характерно, что рассмотренные выше аналитические описания алгоритмов кодирования и декодирования справедливы при условии, что выходы МЛЗ в ДКУ ВК имеют нумерацию, обратную нумерации выходов МЛЗ в КУ ВК. При этом важно, что приемопередача в тракте КУ ВК – КС – ДКУ ВК, т.е. приемопередача ВК, осуществляется по принципу самосинхронизации, который не требует

использования никаких специальных синхросигналов. Это значительно повышает информационную надежность ИК.

Следует заметить, что принципы синтеза и особенности реализации ДКУ ПК достаточно подробно описаны в литературе, например в [4, 6], и в настоящей работе не рассматриваются. Вместе с тем, важно, что в ДКУ ПК могут быть реализованы алгоритмы, соответствующие каналам и с ошибками трансформации, и с ошибками стирания, что также способствует повышению информационной надежности ИК.

5. Заключение

Результаты моделирования предложенного варианта ИК с двухкаскадными кодеками позволяют сделать следующий вывод. Даже при относительно невысокой корректирующей способности двоичного группового ПК с $d_{min}=4$ за счет применения двоичного ВК с КСП удается существенно повысить информационную надежность ИК в условиях действия в КС случайных импульсных помех большой интенсивности. В этом случае, несмотря на то, что число импульсов помех, искажающих одно кодовое слово, больше трех, значения вероятностей исходов приема оказываются на уровне, соответствующем системам I категории по достоверности передачи, что позволяет строить качественные распределенные бортовые беспроводные ЦСПИ различного функционального назначения (ИУС и ИИС).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куатов, Б.Ж. Комплексные показатели надежности авиационной техники / Б.Ж. Куатов, А.Б. Кусаинов, Е.А. Сулайменов, Д.Х. Нуржанов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: Т78 в 2 т. / под.ред. Н.К. Юркова. - Пенза : ПГУ, 2016. – 1 том – С. 253-257.
2. Сергиевский, М.В. Использование беспроводных сенсорных сетей для сбора, передачи и обработки информации в системах мониторинга состояния объектов / М.В. Сергиевский, С.Н. Сыроежкин // Cloud of Science. 2016. Т. 3. № 1. – С.125-136.
3. Львов, А.А. Повышение информационной надежности цифровых систем с QAM/COFDM модуляцией / А. А. Львов, М. С. Светлов, П. В. Мартынов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: "Математика. Механика. Информатика." - 2014. - Т. 14. - № 4. - Ч. 1. - С. 473-482.
4. Юргенсон, Р. И. Помехоустойчивость цифровых систем передачи телемеханической информации / Р. И. Юргенсон. - Л.: Энергия, 1971. - 250 с.
5. Светлов, М.С. Принципы обеспечения повышенной надежности дистанционного тестового контроля / М. С. Светлов, А. А. Львов, Д. В. Кленов //
- Материалы 13 международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения". - Саратов, 2016. - С. 403 - 408.
6. Peterson, W.W. Error-correcting codes / W. W. Peterson, E. J. Weldon. - Cambridge, Massachusetts and London, England: The MIT Press Publ., 1972. - 593 с.
7. Sergievskiy, M.V.The Use of Wireless Sensor Technologies for Condition Monitoring of Modern Aircraft Structures / M.V. Sergievskiy, S.N. Syroezhkin // Modern Applied Science; Vol. 9, No. 8; 2015, P. 266-269.
8. Львов, А. А. Самосинхронизация в информационных каналах с помехами большой интенсивности / А. А. Львов, М. С. Светлов, П. В. Мартынов // Радиотехника. - 2015. - №7. - С. 18-21.

Кленов Дмитрий Викторович (1), Львов Алексей Арленович (1),
Львов Петр Алексеевич (2), Светлов Михаил Семенович (3),
Светлова Марина Константиновна (1)

1. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
2. Энгельсское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глушарева
3. Институт проблем точной механики и управления РАН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО КАНАЛА С КОДЕКОМ НА БАЗЕ КОДОВОГО СИГНАЛЬНОГО ПРИЗНАКА

Аннотация. Работа посвящена синтезу математической модели информационного канала с кодеком, использующим кодовый сигнальный признак. Приводятся теоретическое описание кодового сигнального признака и принципы построения кодека. Рассматриваются особенности построения кодов с кодовым сигнальным признаком. На основе предложенной математической модели исследуется помехоустойчивость информационного канала с кодеком для кодов с кодовым сигнальным признаком. Проводится синтез расчетных формул вероятностей исходов приема для оценки достоверности приемопередачи таких кодов, как в общем виде, так и для наиболее распространенных частных случаев. Показано, что применение кодека с кодовым сигнальным признаком позволяет обеспечить повышенный уровень помехоустойчивости информационных каналов в условиях действия помех большой интенсивности.

Ключевые слова: математическая модель, информационный канал, кодек, кодовый сигнальный признак, помехоустойчивость.

Annotation. The work studies the mathematical model synthesis for the information channel with the codec based on code signal feature. The paper gives the code signal feature theoretical description and the codec construction principles. The construction of the code signal feature-based code is considered. The created mathematical model is used to study the noise immunity of the information channel with the code signal feature-based codes. The paper gives the formulas for reception outcome probabilities for such codes both in generic way and for the most frequently used specific cases. It is shown that application of the codec with code signal feature improves the information channel noise immunity under the influence of high-intensive pulse noise.

Keywords: mathematical model, information channel, codec, code signal feature, noise immunity.

1. Введение

Основной структурной единицей распределенных цифровых информационно-управляющих и информационно-измерительных систем с последовательным синхронным интерфейсом является информационный канал (ИК) как совокупность устройств кодирования (КУ), декодирования (ДКУ) и канала связи (КС) [1]-[4]. Обеспечение требуемого уровня информационной надежности ИК в условиях действия случайных импульсных помех большой интенсивности, когда $i_{pn} = f_{pn}/f_c \geq 3$ (i_{pn} – интенсивность случайной помехи; f_{pn} , f_c – частоты импульсной помехи и кода, соответственно), – главная задача синтеза ИК. Информационная надежность ИК определяется его помехоустойчивостью и характеризуется вероятностями исходов приема: правильного (p_o), ложного (p_f) приемов и защитного отказа (p_{pf}). Традиционно задача повышения помехоустойчивости решается минимизацией значения вероятности ложного приема, в основном, за счет применения корректирующих кодов [1], [2]. Однако в случае действия помех большой интенсивности корректирующая способность таких кодов оказывается не достаточной для обеспечения требуемых показателей по достоверности приемопередачи. Поэтому предлагается в ИК с многокаскадными кодеками на последней ступени кодирования применять код с использованием кодового сигнального признака (КСП).

2. Кодовый сигнальный признак

Как известно, сигнальный признак кода определяет информационный параметр передаваемого по КС сигнала, вид его модуляции и большинство свойств ИК. В теории кодирования рассматривается шесть различных сигнальных признаков. В отличие от пяти первичных сигнальных признаков (амплитудного, временного, частотного, фазового, полярного) КСП считается вторичным (защитным) [5]. При КСП каждый символ первичного кода (ПК) длительностью T_p заменяется кодовым словом вторичного кода (ВК), передаваемым по КС серией (последовательностью) n рабочих импульсов существенно малой длительности τ . Временные задержки между рабочими импульсами строго фиксированы и кратны заранее выбранному значению длительности Δt элементарной задержки. Формирование первого импульса каждой серии происходит с некоторой фиксированной начальной задержкой Δt_0 относительно момента поступления сигнала символа ПК в КУ ВК. Длительность T_A формирования кодовой последовательности ВК определяется как

$$T_A = \Delta t_0 + (n-1)\Delta t < T_p. \quad (1)$$

Для обеспечения высокого уровня помехоустойчивости ИК значения величин задержек $\Delta t_0 \neq k\Delta t$, где $k \in N$, должны быть строго постоянными и одинаковыми для кодека ВК в целом (для КУ и ДКУ ВК) [5].

При многокаскадном кодировании в качестве ПК рассматривается код предпоследней ступени. Для простоты будем полагать, что в ИК используется двухступенчатое кодирование с применением некоторого корректирующего ПК на первой ступени и ВК с КСП на второй ступени кодирования.

Для общности считаем, что ПК – K -ичный, т.е. его символы могут быть пронумерованы от 1 до K , а их значения – в диапазоне $[0, K-1]$. Поэтому "символ i " – символ с номером i и значением $i-1$. ВК должен содержать кодовые слова для каждого из K символов ПК: $A = \{A_i\}_{i \in [1, K]}$.

В результате исследования ВК сформулированы следующие свойства кодовых слов A_i :

- 1) длина слова A_i – $n \geq 5$;
- 2) число единичных разрядов слова A_i – m_i : $3 \leq m_i \leq n-2$, а μ_{iu} – номера позиций с единичными символами: $1 \leq u \leq m_i$, $1 \leq \mu_{iu} \leq n$;
- 3) первый и последний символы слова A_i – единичные: $\mu_{i1} = 1$, $\mu_{im_i} = n$.

Кодирование в КУ ВК каждого кодового слова ПК происходит посимвольно, при этом символу i ставится в соответствие m_i рабочих импульсов, формируемых в моменты времени

$$T_{iu} = \Delta t_0 + (\mu_{iu} - 1)\Delta t, 1 \leq u \leq m_i. \quad (2)$$

Упрощенные блок-схемы КУ и ДКУ ВК представлены на рис. 1 и 2, соответственно. Распределители кодека на многоотводных линиях задержки (МЛЗ) имеют по n выходов: $0 \div n-1$ в КУ и $n-1 \div 0$ в ДКУ. На первых по порядку выходах сигнал задерживается на интервал Δt_0 относительно момента времени поступления сигнала на вход распределителя. На всех последующих выходах сигналы задерживаются на интервал Δt от моментов времени их появления на предыдущих выходах.

Управляемые коммутаторы служат для коммутации выходов распределителей со входами дизъюнкторов в КУ и конъюнкторов в ДКУ. Логика коммутаций определяется видом кодовых слов ВК, точнее, номерами позиций с единичными символами. Принципиально распределитель и коммутатор в совокупности с дизъюнкторами в КУ (с конъюнкторами в ДКУ) выполняют функции кодера (декодера).

Блоки управления, выходные конъюнкторы в КУ, анализатор в ДКУ обеспечивают формирование управляющих, синхронизирующих и выходных сигналов КУ и ДКУ.

Подробное описание работы кодека с КСП приведено в [4] и [8].

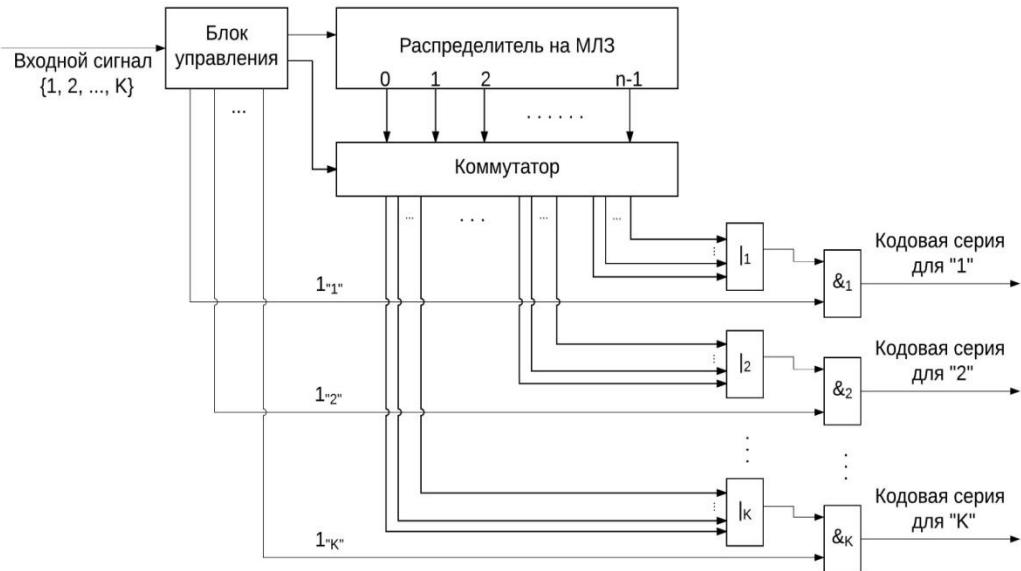


Рисунок 1 – Блок-схема КУ ВК

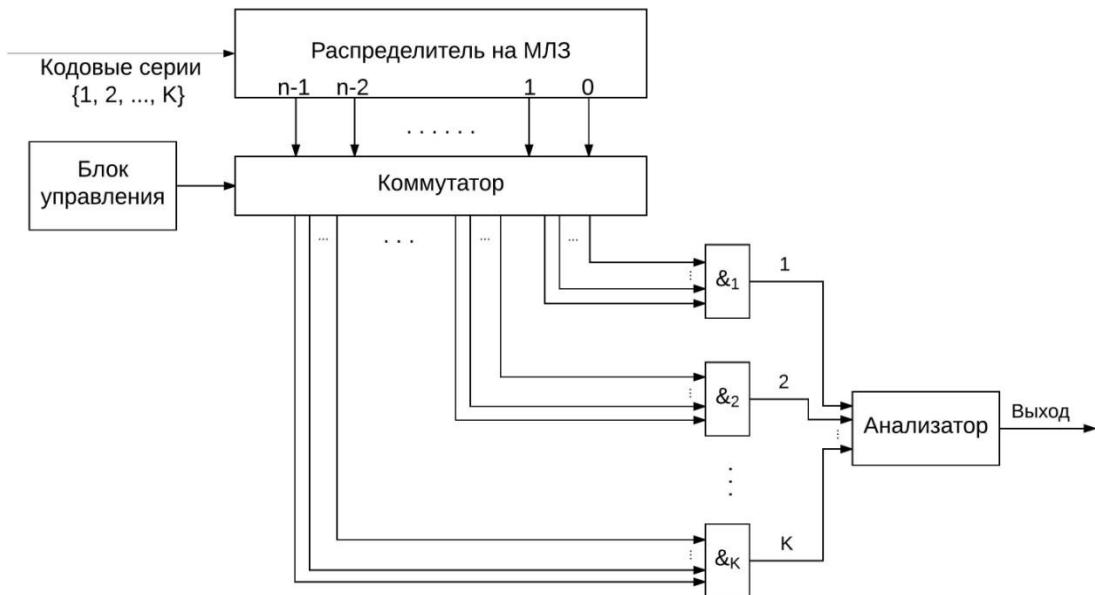


Рисунок 2 – Блок-схема ДКУ ВК

3. Синтез кодовых слов ВК

При построении ИК с кодеком для кода с КСП одним из центральных является вопрос синтеза кодовых слов ВК. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что, помимо трех свойств кодовых слов, приведенных выше, для обеспечения высоких требований по помехоустойчивости должно выполняться условие отсутствия циклических сдвигов в кодовых словах, т.е. никакое кодовое слово ВК не должно являться циклическим сдвигом какого-либо другого кодового слова. Сформулируем это требование математически.

Определение 1. Пусть дана произвольная числовая последовательность $B = (B_1, B_2, \dots, B_m)$ конечной длины m . Назовем ее k -м циклическим сдвигом ($1 \leq k \leq m$) новую последовательность $Q_k(B) = (B_k, B_{k+1}, \dots, B_m, B_1, \dots, B_{k-1})$.

Определение 2. В наборе кодовых слов A отсутствуют циклические сдвиги при выполнении условия:

$$\forall i_1, i_2 : 1 \leq i_1, i_2 \leq K, i_1 \neq i_2; \quad \forall t : 1 \leq t \leq n \quad A_{i_1} \neq Q_t(A_{i_2}).$$

Как показывает анализ помехоустойчивости ВК, вместо условия отсутствия циклических сдвигов в наборе кодовых слов A может быть введено так называемое *интервальное условие*. Для его точной формулировки введем вспомогательное определение.

Определение 3. Будем говорить, что каждое кодовое слово $A_i \in A$ порождает набор попарных интервалов как разностей номеров позиций с символами единиц $S_i = (\mu_{iv} - \mu_{iu})_{1 \leq u < v \leq m_1}$. В общем случае некоторые элементы в этом наборе могут повторяться.

Определение 4. Назовем набор кодовых слов A отвечающим *интервальному условию*, если верны два утверждения:

- Для каждого слова A_i его порожденный набор попарных интервалов S_i не содержит повторяющихся элементов;
- $S_i \cap S_j = \{n-1\}$ при $i \neq j$.

Первое утверждение означает, что в кодовом слове A_i отсутствуют одинаковые попарные интервалы между позициями с символами единиц. Второе утверждение устанавливает такое же ограничение на весь набор A , допуская лишь повторение интервалов, созданных парой единиц (μ_{ii}, μ_{im_1}) каждого слова A_i .

Следствие 1. В наборе кодовых слов A все номера позиций с единичными символами, кроме 1 и n , различны.

Действительно, пусть есть 2 совпадающие по номерам позиции: $\mu_{iu} = \mu_{jv} = \mu$, $i \neq j$. В этом случае $S_i \cap S_j = \{\mu-1, n-\mu, n-1\}$, что противоречит интервальному условию.

Это следствие позволяет доказать более важное утверждение о минимальном кодовом расстоянии ВК.

Следствие 2. Если набор кодовых слов A удовлетворяет интервальному условию, то в этом наборе достигается максимальное значение минимального кодового расстояния между кодовыми словами.

Действительно, если все номера единичных позиций, кроме 1 и n , различны, то каждое кодовое слово A_i содержит по $m_1 - 2$ единичных позиций с оригинальными номерами, принадлежащими только этому слову. Следовательно, минимальное кодовое расстояние между двумя любыми кодовыми словами из набора A будет равно $d_{min} = 2(m_1 - 2)$. С другой стороны, в [1] и [10] показано, что $2(m_1 - 2) = (d_{min})_{max}$, что в совокупности доказывает справедливость следствия. Подробно эти следствия рассмотрены в [11].

Введенное интервальное условие является более сильным, чем условие отсутствия циклических сдвигов. В частности, существуют наборы кодовых слов, в которых циклические сдвиги отсутствуют, но максимальное кодовое расстояние не достигается.

Докажем, что требование соблюдения интервального условия гарантирует отсутствие циклических сдвигов.

Теорема 1. Чтобы набор кодовых слов A отвечал интервальному условию, необходимо выполнение условия отсутствия циклических сдвигов.

Доказательство. Используем метод доказательства от противного. Предположим, что существуют 2 кодовых слова A_i, A_j , $1 \leq i, j \leq K, i \neq j$, таких, что $A_t = Q_t(A_j)$ при некотором t , $1 \leq t \leq n$. По определению циклического сдвига получим:

$$A_i = (A_{jt}, A_{jt+1}, \dots, A_{jn}, A_{j1}, \dots, A_{jt-1}). \quad (3)$$

Отметим, что t должно быть выбрано так, чтобы $A_{jt-1} = A_{jt} = 1$, так как кодовое слово A_i должно начинаться и заканчиваться единичными символами. Запишем равенство (3) в формульном виде. Пусть x – номер позиции некоторого символа в слове A_i , а y – номер позиции этого же символа в слове A_j до операции циклического сдвига:

$$A_{ix} = A_{j,(x+t-2)_{modi}+1} = A_{jy}, 1 \leq x, y \leq n.$$

Приравняв индексы символов, получим:

$$y = (x + t - 2)_{modi} + 1. \quad (4)$$

Выразим x из (4):

$$x = (y + n - t)_{modi} + 1. \quad (5)$$

Отсюда получаем формулу для символов A_j : $A_{jy} = A_{i,(y+n-t)_{modi}+1}$.

Рассмотрим 2 случая.

1. Пусть $t \neq n$. Это значит, что $n - t \neq 0$, следовательно, $S_i \neq n - t$. По формуле (5) определим индексы символов A_{jt} и A_{jn} в слове A_i . Найдем позицию символа A_{jt} в слове A_i :

$$x_1 = (t + n - t)_{modi} + 1 = 1.$$

Найдем позицию символа A_{jn} в слове A_i :

$$x_2 = (n + n - t)_{modi} + 1 = (n - t)_{modi} + 1 = n - t + 1.$$

Таким образом: $A_{jt} = A_{i1} = 1$, $A_{jn} = A_{i,n-t+1} = 1$. Так как $t \neq n$, то $n - t + 1 > 1$, и позиции x_1 и x_2 не совпадают. Следовательно, $S_i \neq (n - t + 1) - 1 = n - t$, что противоречит интервальному условию.

2. Пусть $t = n$. В этом случае, как было отмечено ранее, для формирования корректного кодового слова A_i должно выполняться равенство $A_{jt-1} = 1$. Это означает, что $S_i \neq (t - 1) - 1 = (n - 1) - 1 = n - 2$. По формуле (5) определим индексы символов A_{j1} и A_{jt-1} в слове A_i . Номер позиции символа A_{j1} :

$$x_1 = (1 - t + n)_{modi} + 1 = (1 - n + n)_{modi} + 1 = 2.$$

Номер позиции символа A_{jt-1} :

$$x_2 = (t - 1 - t + n)_{modi} + 1 = (n - 1)_{modi} + 1 = n.$$

Итак: $A_{j1} = A_{i2} = 1$, $A_{jt-1} = A_{in} = 1$. Следовательно: $S_i \neq n - 2$, что противоречит интервальному условию.

4. Оценка достоверности приемопередачи

Пусть математическая модель ИК соответствует всем выше сформулированным требованиям. Проведем оценку достоверности приемопередачи, считая, что A_s – амплитуда рабочего импульса ВК, h – значение порога однопороговой первой решающей схемы ДКУ ВК, распределение потока помех – по закону Пуассона $p(k) = \frac{i_{pn}^k}{k!} e^{-i_{pn}}$, $k \geq 0$ при нормальном распределении амплитуд импульсов помех с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 :

$$p(A_{pn} = x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Найдем вероятность $r(k)$, $k \geq 0$, попадания k импульсов помех во временной интервал отдельно взятого фиксированного рабочего импульса. Формулу Пуассона для $p(k)$ напрямую использовать нельзя, так как интенсивность i_{pn} выражает среднее количество импульсов помех, попадающих на временной отрезок передачи одного символа ПК длины T_p . Соответственно, на отрезок, равный длительности τ рабочего импульса, придется пропорционально меньшее число импульсов помех, а именно $i_{pn} \frac{\tau}{T_p}$.

С учетом этого получим:

$$r(k) = \frac{\left(i_{pn} \frac{\tau}{T_p}\right)^k}{k!} e^{-i_{pn} \frac{\tau}{T_p}}. \quad (6)$$

Определим вероятности r_{00} , r_{01} , r_{10} , r_{11} для одного символа. Пусть $r_{ij}^{(k)}$, где $0 \leq i, j \leq 1$, $k \geq 0$, – вероятности переходов символа i в символ j (трансформации при $i \neq j$, правильного приема при $i = j$) под действием k импульсов помех и пусть при $k = 0$ выполняются условия:

$$r_{ij}^{(0)} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j; \\ 0, & \text{если } i \neq j. \end{cases}$$

Найдем вероятности $r_{ij}^{(k)}$ при $k > 0$. Для примера определим $r_{00}^{(k)}$. Если A_k – случайная величина, характеризующая амплитуду k -го импульса помехи, то амплитуда сигнала, полученного ДКУ, равна $A = 0 + A_1 + A_2 + \dots + A_k$. Для декодирования символа 0 должно выполняться условие $A < h$, что дает неравенство $A_1 + A_2 + \dots + A_k < h$. Найдем вероятность такого события. Так как амплитуды импульсов помех – величины независимые, то амплитуда одного импульса помехи никак не влияет на амплитуды других импульсов помех. Известно [12], что сумма независимых гауссовых величин с параметрами $(\mu_1, \sigma_1^2), (\mu_2, \sigma_2^2), \dots, (\mu_k, \sigma_k^2)$ – также гауссова величина с параметрами $(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_k, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_k^2)$. В нашем случае $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$, $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_k = \sigma$, следовательно, сумма ξ амплитуд импульсов помех – гауссова величина с параметрами $(k\mu, k\sigma^2)$. Таким образом:

$$r_{00}^{(k)} = p(A_1 + A_2 + \dots + A_k < h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{k\sigma}} \int_{-\infty}^h e^{-\frac{(\xi-k\mu)^2}{2k\sigma^2}} d\xi. \quad (7)$$

Аналогично получим остальные формулы:

$$r_{01}^{(k)} = p(A_1 + A_2 + \dots + A_k \geq h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{k\sigma}} \int_h^{+\infty} e^{-\frac{(\xi-k\mu)^2}{2k\sigma^2}} d\xi; \quad (8)$$

$$r_{10}^{(k)} = p(A_s + A_1 + A_2 + \dots + A_k < h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{k\sigma}} \int_{-\infty}^{h-A_s} e^{-\frac{(\xi-k\mu)^2}{2k\sigma^2}} d\xi; \quad (9)$$

$$r_{11}^{(k)} = p(A_s + A_1 + A_2 + \dots + A_k \geq h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{k\sigma}} \int_{h-A_s}^{+\infty} e^{-\frac{(\xi-k\mu)^2}{2k\sigma^2}} d\xi. \quad (10)$$

Просуммировав (7) - (10) по k , в итоге получим:

$$r_{ij} = \sum_{k=0}^{\infty} r(k) r_{ij}^{(k)} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(i_{pn} \frac{\tau}{T_p}\right)^k}{k!} e^{-i_{pn} \frac{\tau}{T_p}} r_{ij}^{(k)}. \quad (11)$$

Если учесть, что кодек ПК обычно работает в режиме циклической синхронизации, а в ДКУ ПК используется временное стробирование, то моменты приема символов ПК можно считать фиксированными. Поэтому любые символы, принятые ДКУ ВК вне этих моментов, не будут учитываться в ДКУ ПК. Соответственно, их можно игнорировать и при оценке вероятностей исходов приема ВК.

Для вычисления вероятностей исходов приема сначала найдем вероятности некоторых вспомогательных событий.

Кодек ВК работает в режиме самосинхронизации, поэтому моменты формирования результатов декодирования кодовых слов ВК строго фиксированы. Учитывая это, одним из ключевых аспектов алгоритма декодирования является факт приема или неприема *краевых* единиц (первой и последней единиц кодового слова ВК), в отличие от которых остальные единицы кодового слова ВК – *внутренние*. Если хотя бы одна из краевых единиц не принята, то ни верное, ни ложное декодирование не возможны. Действие помех на каждую из краевых единиц происходит независимо. Поэтому вероятность приема обеих краевых единиц кодового слова определится как:

$$p(\text{приема краевых единиц}) = r_{11}^2, \quad (12)$$

соответственно, вероятность того, что хотя бы одна из этих единиц не принята

$$p(\text{трансформации в 0 минимум одной краевой единицы}) = 1 - r_{11}^2. \quad (13)$$

Все вспомогательные события ниже рассматриваются при условии, что краевые единицы приняты верно. При этом вероятность приема краевых единиц (12) в явном виде во вспомогательных формулах отсутствует.

Детальный анализ алгоритмов декодирования кодовых слов в ДКУ ВК позволяет получить следующие вероятности вспомогательных событий:

$$p(\text{приема правильного кодового слова}) = r_{11}^{m_1-2}; \quad (14)$$

$$p(\text{неприема правильного кодового слова}) = 1 - r_{11}^{m_1-2}; \quad (15)$$

$$p(\text{приема ложного кодового слова}) = (K-1)r_{01}^{m_1-2}; \quad (16)$$

$$p(\text{неприема } Y \text{ ложных кодовых слов}) = (1 - r_{01}^{m_1-2})^Y; \quad (17)$$

$$p(\text{приема одного и более ложных кодовых слов}) = 1 - (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1}; \quad (18)$$

$$p(\text{приема ровно одного ложного кодового слова}) = (K-1)r_{01}^{m_1-2}(1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-2}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} p(\text{приема двух и более ложных кодовых слов}) &= \\ &= 1 - (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1} - (K-1)r_{01}^{m_1-2}(1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-2}. \end{aligned} \quad (20)$$

Используя формулы (12) - (20) получим искомые вероятности исходов приема.

Правильный прием происходит, когда принято верное кодовое слово и не принято ни одно из $K-1$ ложных кодовых слов. Используем формулы (12), (14) и (17):

$$p_{cr} = r_{11}^2 r_{11}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1} = r_{11}^{m_1} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1}. \quad (21)$$

Ложный прием возникает, когда не принято верное кодовое слово и при этом принято только одно из $K-1$ ложных кодовых слов. Используем формулы (12), (15) и (19):

$$p_{fr} = r_{11}^2 (1 - r_{11}^{m_1-2}) (K-1) r_{01}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-2}. \quad (22)$$

Заданный отказ происходит, когда не принято ни одного кодового слова или в результате действия помех одновременно декодировано два или более кодовых слов. Каждый из этих случаев, в свою очередь, разбивается на два подслучаев:

- не принято ни одного кодового слова:

- a) трансформированы в ноль одна или обе из краевых единиц;

- b) краевые единицы не трансформированы, но при этом не приняты ни правильное, ни ложное кодовые слова;

- принято 2 и более кодовых слов:

- v) приняты верное кодовое слово и, как минимум, одно из ложных кодовых слов;

- g) не принято верное кодовое слово, но приняты, как минимум, 2 ложных кодовых слова.

Суммируя вероятности событий a) ÷ g) и используя формулы с (12) по (20), получим:

$$\begin{aligned} p_{pf} &= (1 - r_{11}^2) + r_{11}^2 (1 - r_{11}^{m_1-2}) (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1} + r_{11}^2 r_{11}^{m_1-2} (1 - (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1}) + \\ &+ r_{11}^2 (1 - r_{11}^{m_1-2}) \{ 1 - (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1} - (K-1) r_{01}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-2} \} = \\ &= (1 - r_{11}^2) + r_{11}^2 ((1 - r_{11}^{m_1-2}) (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1} + r_{11}^{m_1-2} (1 - (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1}) + \\ &+ (1 - r_{11}^{m_1-2}) \{ 1 - (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1} - (K-1) r_{01}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-2} \}). \end{aligned}$$

После некоторых преобразований получим окончательную формулу вероятности защитного отказа:

$$p_{pf} = 1 - r_{11}^{m_1} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1} - r_{11}^2 (1 - r_{11}^{m_1-2}) (K-1) r_{01}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-2}. \quad (23)$$

Из формул (21) - (23) следует, что правильный, ложный приемы и защитный отказ образуют полную систему событий.

Заметим, что формулы (21) - (23) не зависят от закона распределения потока помех в КС, а важны лишь итоговые вероятности переходов символов r_{ij} . Этот факт позволяет использовать полученные формулы при различных законах распределения потока импульсов помех в КС и любых метриках межсимвольных расстояний.

На практике обычно известна статистика КС, т.е. вероятности трансформации символов, поэтому формулы (21) - (23) удобнее записать с учетом того, что $r_{11} = 1 - r_{10}$:

$$P_{cr} = (1 - r_{10})^{m_1} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1}; \quad (24)$$

$$P_{fr} = (1 - r_{10})^2 (1 - (1 - r_{10})^{m_1-2}) (K-1) r_{01}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-2}; \quad (25)$$

$$\begin{aligned} p_{pf} = & 1 - (1 - r_{10})^{m_1} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-1} - \\ & - (1 - r_{10})^2 (1 - (1 - r_{10})^{m_1-2}) (K-1) r_{01}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2})^{K-2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Рассмотрим частный случай ИК, когда $K = 2$, т.е. алфавит ПК или двоичный изначально, или сведен к двоичному путем специфических преобразований. В этом случае формулы (24) - (26) примут вид:

$$P_{cr} = (1 - r_{10})^{m_1} (1 - r_{01}^{m_1-2}); \quad (27)$$

$$P_{fr} = (1 - r_{10})^2 (1 - (1 - r_{10})^{m_1-2}) r_{01}^{m_1-2}; \quad (28)$$

$$p_{pf} = 1 - (1 - r_{10})^2 ((1 - r_{10})^{m_1-2} (1 - 2r_{01}^{m_1-2}) + r_{01}^{m_1-2}). \quad (29)$$

Еще одним из часто используемых ПК является троичный код без использования нулевого сигнального признака, когда формально алфавит ПК является троичным, но нулевой символ не используется. Как показывает анализ математической модели, для оценки достоверности приемопередачи в этом случае справедливы формулы (27) - (29).

Для натурального троичного ПК могут быть получены следующие формулы:

$$P_{cr} = (1 - r_{10})^{m_1} (1 - r_{01}^{m_1-2})^2; \quad (30)$$

$$P_{fr} = 2(1 - r_{10})^2 (1 - (1 - r_{10})^{m_1-2}) r_{01}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2}); \quad (31)$$

$$p_{pf} = 1 - (1 - r_{10})^{m_1} (1 - r_{01}^{m_1-2})^2 - 2(1 - r_{10})^2 (1 - (1 - r_{10})^{m_1-2}) r_{01}^{m_1-2} (1 - r_{01}^{m_1-2}). \quad (32)$$

5. Заключение

В работе представлена математическая модель ИК с многокаскадным кодированием и кодеком последнего каскада, использующим код с КСП. На ее базе проведена оценка достоверности приемопередачи на основе формул вычисления вероятностей исходов приема для общего случая и для наиболее часто встречающихся частных видов ИК – двоичного и троичного каналов, а также троичного канала без использования нуля. При этом существенно повышается помехоустойчивость ИК в условиях действия помех большой интенсивности, в том числе за счет режима самосинхронизации кодека с КСП. Как показывают результаты моделирования, вероятность ложного приема может быть снижена на 2-3 порядка по сравнению с вариантами ИК без использования кодеков с КСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Peterson, W.W. Error-correcting codes / W. W. Peterson, E. J. Weldon. - Cambridge, Massachusetts and London, England: The MIT Press Publ., 1972. - 593 c.
- Golomb, S.W. Digital Communications with Space Applications / S. W. Golomb. - New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice-Hall Publ., 1964. - 272 c.
- Светлов, М.С. Принципы обеспечения повышенной надежности дистанционного тестового контроля / М. С. Светлов, А. А. Львов, Д. В. Кленов // Материалы 13 международной

конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения". - Саратов, 2016. - С. 403 - 408.

4. Львов, А.А. Повышение информационной надежности цифровых систем с QAM/COFDM модуляцией / А. А. Львов, М. С. Светлов, П. В. Мартынов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: "Математика. Механика. Информатика." - 2014. - Т. 14. - № 4. - Ч. 1. - С. 473-482.

5. Юргенсон, Р. И. Помехоустойчивость цифровых систем передачи телемеханической информации / Р. И. Юргенсон. - Л.: Энергия, 1971. - 250 с.

6. Львов, А. А. Самосинхронизация в информационных каналах с помехами большой интенсивности / А. А. Львов, М. С. Светлов, П. В. Мартынов // Радиотехника. - 2015. - №7. - С. 18-21.

7. Svetlov, M. S. Self-synchronized encoding and decoding algorithms based on code signal feature / M. S. Svetlov, A. A. L'vov, D. V. Klenov, O. N. Dolinina // Proceedings of the 27th Internaional Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Brno, Czech Republic, 2017, pp. 1-5. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2017.7936641.

8. L'vov, A. A. Improvement of information reliability of digital systems with QAM/COFDM modulation / A. A. L'vov, M. S. Svetlov and P. V. Martynov // Proceedings of the 20th IMEKO TC4 Symposium, Benevento, Italy, 2014, pp. 479-484.

9. Svetlov, M. S. Algorithms of Coding and Decoding for Code with Code Signal Feature / M. S. Svetlov, A. A. L'vov, D. V. Klenov, O. N. Dolinina // Proceedings of the 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 748-752. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910666.

10. Shannon, C. E. A Mathematical Theory of Communication / C.E. Shannon // Bell System Technical Journal. — 1948. — Vol. 27. — P. 379—423.

11. Светлов, М. С. Некоторые свойства кода на основе кодового сигнального признака / М. С. Светлов, А. А. Львов, Д. В. Кленов, О. М. Балабан // Материалы 13 международной конференции "Перспективные информационные технологии" (ПИТ 2017). - Самара, 2017. - С. 992 - 995. ISBN: 978-5-93424-784-4.

12. Weisstein, Eric W. "Normal Sum Distribution." From MathWorld—A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/NormalSumDistribution.html>

Кухарова Татьяна Валерьевна, Уткин Владимир Александрович

Северо-Кавказский федеральный университет

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ НАКОЖНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ У ПАЦИЕНТОВ С ПСИХИЧЕСКИМИ РАССТРОЙСТВАМИ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗА

Аннотация. В данной статье представлены результаты факторного анализа параметров электропроводности, полученных при измерении накожными электродами у здоровых людей и пациентов с психическими расстройствами различного генеза. Полученные факторные отображения весьма схожи, т.е. на организм человека при формировании патологий различного генеза и в норме действуют идентичные факторы, величины которых различаются несущественно, а наличие и характер патологии определяются внутренними механизмами реакции организма на данные факторы.

Ключевые слова: параметры электропроводности, психическое состояние человека, классифицирующие функции, факторный анализ.

Annotation. This article presents the results of a factor analysis of the conductivity parameters obtained by skin electrodes measuring in healthy people and patients with mental disorders of various genesis. The resulting factor maps are very similar, i.e. at the human organism in the formation of different genesis pathologies and in the normal affect identical factors, the values of which differ insignificantly, and the presence and nature of pathology are determined by the internal mechanisms of the organism's response to these factors.

Keywords: conductivity parameters, mental state of a person, classing functions, factor analysis.

В основу данного исследования положен анализ параметров электропроводности, полученных при измерении накожными электродами.

Для целей настоящего исследования отобраны данные клинико-психофизиологических обследований 469 пациентов ГУ Клиники пограничных состояний СГМА, Ставропольской краевой клинической психиатрической больницы №1, Новочеркасского филиала Ростовского областного психоневрологического диспансера. Возраст пациентов – от 8 лет до 81 года, пол – 235 мужчин и 234 женщины. Кроме этого группу контроля составили 132 условно-здоровых добровольцев без явных признаков психической или соматической патологии – учащихся и преподавателей Ставропольского государственного университета. Возраст добровольцев – от 16 до 29 лет, пол – 89 женщин и 43 – мужчины.

Сформировано 4 группы исследования. Ниже представлено распределение пациентов по подгруппам в соответствии с клиническими рубриками по МКБ-10 (параметр *n* обозначает количество обследованных пациентов с данной патологией):

1. В первую группу исследования вошли пациенты с клинически верифицированными психическими расстройствами экзогенного происхождения (*n*=104):

- 1.1. Органические психотические расстройства - бредовые и галлюцинаторные – F06.0; F06.1; F06.2; (*n*=5).
- 1.2. Органические непсихотические депрессивные расстройства – F06.36 (*n*=8).
- 1.3. Органические тревожные и фобические расстройства – F06.4 (*n*=5).
- 1.4. Органические астенические расстройства – F06.6 (*n*=43):
 - 1.4.1. вследствие смешанных причин (*n*=14);
 - 1.4.2. вследствие повреждений головного мозга (*n*=18);
 - 1.4.3. вследствие цереброваскулярных нарушений (*n*=11).
- 1.5. Органические расстройства личности – F07 (*n*=19).
- 1.6. Последствия неонатального поражения ЦНС – F06.9 (*n*=8).
- 1.7. Расстройства, связанные с употреблением психоактивных веществ – F1x.0; F1x.1; F1x.2; F1x.3 (*n*=16):
 - 1.7.1. алкоголя (*n*=7);

1.7.2. опиоидов ($n=9$).

2. Во вторую группу исследования вошли пациенты с клинически верифицированными эндогенными психическими расстройствами ($n=295$):

2а. Пациенты с шизофренией и расстройствами шизофренического спектра – F20-F29 ($n=249$):

2а.1. Пациенты с шизофренией – F20 ($n=166$), в том числе:

2а.1.1. пациенты с острой шизофренией, в картине которой преобладала продуктивная психопатологическая симптоматика в виде бреда, галлюцинаций, аффективных нарушений – F20.0 ($n=92$);

2а.1.2. пациенты с латентным, неврозо- и психопатоподобным, вялотекущим течением болезни – F21.3; F21.4; F21.5 ($n=44$);

2а.1.3. пациенты, в клинической картине болезни которых преобладала негативная психопатологическая симптоматика с нарастанием эмоционально-волевого и нейрокогнитивного дефицита в рамках простой, резидуальной формы, пропфшизофрении и постшизофренической депрессии – F20.4; F20.6 ($n=30$).

2а.2. Пациенты с расстройствами шизофренического спектра – F21 ($n=87$):

2а.2.1. шизотипическими – F21 ($n=26$);

2а.2.2. хроническими бредовыми F22 ($n=3$);

2а.2.3. острыми психотическими или шизофреноподобными – F23 ($n=10$);

2а.2.4. шизоаффективными – F25 ($n=43$).

2б. Пациенты с эндогенными аффективными расстройствами – F30-F39 ($n=46$):

2б.1. Пациенты с биполярным аффективным расстройством (БАР) – F31 ($n=10$):

2б.1.1. с текущим маниакальным эпизодом – F31.1 ($n=5$);

2б.1.2. с текущим депрессивным эпизодом – F31.4 ($n=5$).

2б.2. Пациенты с депрессивным эпизодом униполярной депрессии – F32 ($n=14$):

2б.2.1. с somатическими симптомами – F32.01; F32.11 ($n=9$);

2б.2.2. без somатических симптомов F32.00; F32.10 ($n=5$).

2б.3. Пациенты с рекуррентной депрессией – F33 ($n=23$).

3. В третью группу исследования вошли пациенты с клинически верифицированными невротическими расстройствами психогенного генеза ($n=70$):

3.1. Расстройства тревожного и депрессивного спектра - F41; F41.3 ($n=21$):

3.1.1. паническое расстройство – F41.0 ($n=8$);

3.1.2. смешанное тревожное и депрессивное расстройство – F41.2 ($n=13$).

3.2. Расстройства, связанные со стрессом или нарушением адаптации – F43 ($n=24$):

3.2.1. острая реакция на стресс – F43.0 ($n=6$);

3.2.2. посттравматическое стрессовое расстройство – F43.1 ($n=4$);

3.2.3. расстройства адаптации - F43.2 ($n=14$).

3.3. Конверсионные (диссоциативные) расстройства - F44 ($n=6$).

3.4. Соматоформные расстройства F45.3 ($n=9$).

3.5. Неврастения F48.0 ($n=10$).

4. В четвертую группу вошли условно-здоровые добровольцы из группы контроля ($n=132$).

Параметры накожной электропроводности получены при обследовании с помощью АПК «AMCAT-КОВЕРТ».

AMCAT (автоматизированная медицинская система анализа терапии) представляет собой комплекс из измерительного устройства, компьютера и измерительно-диагностирующей программы. Ее основное назначение состоит в поиске органов и систем органов с измененной функцией, как и органов и систем с нарушенной вегетативной регуляцией.

"AMCAT-КОВЕРТ" автоматически проводит последовательное сканирование тела человека импульсами отрицательной и положительной полярности с использованием трех пар электродов: лобных, ручных и ножных (22 отведения). Напряжение воздействующего на пациента в процессе

диагностики электрического тест-сигнала не превышает 1,5 В, сила тока не превышает 50 мА, частота следования импульсов 10 Гц, что соответствует требованиям безопасности.

В качестве исходных данных исследования использованы 4 параметра каждого отведения:

int - показатель проводимости, в условных единицах «шкалы Фолля» - от 0 до 100 единиц;

r_{ik} - емкостная составляющая проводимости («падение стрелки» в терминологии Р. Фолля),

в условных единицах;

БФО – базовый фактор отклонения – интегральный количественный показатель, включающий в себя обработанные по заложенному в АПК «АМСАТ-КОВЕРТ» математическому алгоритму первичные данные отведения, в процентах отклонения от условной нормы - от -100 до +100;

БКС – базовый коллоидный сдвиг – показатель, рассчитываемый по заложенному в АПК «АМСАТ-КОВЕРТ» математическому алгоритму и характеризующий коллоидное состояние агрегации в организме при влиянии динамических факторов электрических процессов, в условных единицах.

С помощью блока приложений ANOVA-M v.2 квалиметрической среды S A D Q O [В.А.Уткин, 2002, 2003] были найдены статистические характеристики каждого ряда, образованного показаниями каждого параметра по каждому отведению (всего 88 показателей) для каждой из четырех групп исследования (пациенты с экзогенными, эндогенными и психогенными психическими расстройствами и здоровые). Получены следующие статистические показатели: максимальное и минимальное значение, вариационный размах, медиана, среднее, стандарт, асимметрия, эксцесс, коэффициент вариации, показатель точности опыта, достоверность последних семи характеристик и наличие отклонения от нормального распределения.

С целью выявления показателей с наибольшей неоднородностью выполнен дисперсионный анализ, проведены попарные сопоставления рядов по основным статистическим характеристикам.

Для определения однородности выборок были применены медианный критерий, рангово-дисперсионный критерий, дисперсионный критерий Бартлетта, дисперсионный критерий Фишера, рангово-дисперсионные критерии упорядочения. Определялось и наличие или отсутствие отличия положения средней каждого из рядов относительно средней для всей совокупности.

Попарные сравнения выборок опирались на применение критериев Данна, Дункана, критерия "лямбда", критерия "омега", медианного критерия, серийного критерия Вальда-Вольфовича, рангового критерия Вилкоксона, критерия Фишера и критерия Стьюдента.

Значимость различий выявлена при попарном сопоставлении рядов, образованных значениями показателей мужчин и женщин внутри групп наблюдений.

В дальнейшем для проведения дискриминантного анализа отобраны показатели, неоднородность данных по которым проявилась в наибольшей мере:

параметр int 7-го, 8-го, 12-го, 20-го отведений; параметр r_{ik} 7-го, 12-го, 21-го, 22-го отведений; параметр БФО 3-го, 4-го, 18-го отведений; параметр БКС 1-го, 3-го, 9-го отведений для женщин;

параметр int 2-го, 3-го, 12-го, 20-го отведений; параметр r_{ik} 7-го, 8-го отведений; параметр БФО 2-го, 15-го, 17-го, 18-го отведений; параметр БКС 1-го, 7-го, 9-го, 17-го, 19-го отведений для мужчин [1].

По отобранным параметрам проведен дискриминантный анализ, в том числе и раздельно для мужчин и женщин. Получены канонические и стандартизованные коэффициенты дискриминантных функций, полные и групповые структурные коэффициенты дискриминации, найдены оценки дискриминантных функций, центроиды каждого класса каждой функции, простые классифицирующие функции и оценены характеристики качества распознавания при применении как канонических коэффициентов дискриминантных функций, так и простых классифицирующих функций. Применение полученных простых классифицирующих функций обеспечило более высокое качество распознавания, чем при использовании канонических коэффициентов дискриминантных функций. Выявлено также, что включение возраста обследованного в число параметров значительно повышает качество распознавания.

Ниже представлены простые классифицирующие функции, полученные при дискриминантном анализе отобранных показателей.

Для женщин:

$$\begin{aligned}y_{\text{экзогенез}} &= 0.7012 \times v - 0.0686 \times int7 - 0.2985 \times int8 + 1.6939 \times int12 - 0.8983 \times int20 + \\&+ 7.7930 \times pik7 + 1.5798 \times pik12 + 3.0067 \times pik21 - 1.1813 \times pik22 + 0.0518 \times БФО3 + \\&+ 0.0921 \times БФО4 - 0.0362 \times БФО18 + 0.7662 \times БКС1 + 0.4433 \times БКС3 - 0.4815 \times БКС9 - \\&- 198.3890; \\y_{\text{эндогенез}} &= 0.6746 \times v - 0.0289 \times int7 - 0.3487 \times int8 + 1.5911 \times int12 - 0.8170 \times int20 + \\&+ 7.6913 \times pik7 + 1.6911 \times pik12 + 3.0561 \times pik21 - 1.2057 \times pik22 + 0.1371 \times БФО3 + \\&+ 0.0978 \times БФО4 - 0.1478 \times БФО18 + 0.7374 \times БКС1 + 0.5062 \times БКС3 - 0.5325 \times БКС9 - \\&- 195.3523; \\y_{\text{психогенез}} &= 0.6949 \times v - 0.1946 \times int7 - 0.4236 \times int8 + 1.5905 \times int12 - 0.9241 \times int20 + \\&7.5991 \times pik7 + 1.8084 \times pik12 + 3.1711 \times pik21 - 1.2323 \times pik22 + 0.0082 \times БФО3 + \\&0.0838 \times БФО4 - 0.0000 \times БФО18 + 0.7357 \times БКС1 + 0.4428 \times БКС3 - 0.4832 \times БКС9 - \\&- 202.6567; \\y_{\text{норма}} &= 0.5719 \times v - 0.2303 \times int7 - 0.8123 \times int8 + 1.7729 \times int12 - 0.7649 \times int20 + \\&+ 8.2696 \times pik7 + 1.2958 \times pik12 + 3.0150 \times pik21 - 1.1349 \times pik22 + 0.1494 \times БФО3 + \\&+ 0.0922 \times БФО4 - 0.1412 \times БФО18 + 0.7461 \times БКС1 + 0.4299 \times БКС3 - 0.4593 \times БКС9 - \\&- 201.6183.\end{aligned}$$

Для мужчин:

$$\begin{aligned}y_{\text{экзогенез}} &= 0.5949 \times v + 0.7059 \times int2 + 0.2687 \times int3 + 6.8950 \times int12 - 5.8887 \times int20 + \\&+ 17.1262 \times pik7 + 9.2494 \times pik8 + 0.5609 \times БФО2 - 0.9032 \times БФО15 + 0.0346 \times БФО17 - \\&0.1591 \times БФО18 + 0.4217 \times БКС1 - 0.0906 \times БКС7 - 0.1012 \times БКС9 + 0.9409 \times БКС17 + \\&+ 1.5474 \times БКС19 - 457.1445; \\y_{\text{эндогенез}} &= 0.5588 \times v + 0.7399 \times int2 + 0.2242 \times int3 + 6.8592 \times int12 - 5.8983 \times int20 + \\&+ 18.0449 \times pik7 + 8.5005 \times pik8 + 0.5561 \times БФО2 - 0.9215 \times БФО15 + 0.0086 \times БФО17 - \\&0.1184 \times БФО18 + 0.3976 \times БКС1 - 0.0984 \times БКС7 - 0.1281 \times БКС9 + 0.9314 \times БКС17 + \\&+ 1.6297 \times БКС19 - 454.3653; \\y_{\text{психогенез}} &= 0.7138 \times v + 0.7864 \times int2 + 0.2363 \times int3 + 7.0484 \times int12 - 6.0469 \times int20 + \\&+ 18.1977 \times pik7 + 8.4053 \times pik8 + 0.5391 \times БФО2 - 0.9205 \times БФО15 + 0.0184 \times БФО17 - \\&- 0.1340 \times БФО18 + 0.4102 \times БКС1 - 0.1125 \times БКС7 - 0.1127 \times БКС9 + 0.9172 \times БКС17 + \\&+ 1.6296 \times БКС19 - 469.7084; \\y_{\text{норма}} &= 0.4715 \times v + 0.6815 \times int2 + 0.2654 \times int3 + 6.9078 \times int12 - 5.9003 \times int20 + \\&+ 17.7090 \times pik7 + 8.6792 \times pik8 + 0.5088 \times БФО2 - 0.8654 \times БФО15 + 0.0342 \times БФО17 - \\&- 0.1324 \times БФО18 + 0.4148 \times БКС1 - 0.1297 \times БКС7 - 0.0800 \times БКС9 + 0.9480 \times БКС17 + \\&+ 1.5037 \times БКС19 - 453.0513;\end{aligned}$$

Параметр v обозначает возраст обследованного человека в годах. Основанием для отнесения объекта к определенному классу является максимальное значение соответствующей классифицирующей функции [2].

При построении критерия принадлежности психического состояния к диапазону нормы или патологии как значимые для распознавания отобраны параметры $int11$, $int18$, $БФО16$, $БКС7$ и $БКС18$. В результате дискриминантного анализа по отобранным параметрам получены

классифицирующие функции, позволяющие определить наличие у человека психического расстройства.

$$y_{\text{патологии}} = 12,4780 \cdot p + 0,5032 \cdot v + 0,6415 \cdot \text{int11} + 0,2878 \cdot \text{int18} - 0,0857 \cdot \text{БФО16} + \\ + 0,1262 \cdot \text{БКС7} + 0,2627 \cdot \text{БКС18} - 58,9267;$$

$$y_{\text{нормы}} = 10,6834 \cdot p + 0,4026 \cdot v + 0,6325 \cdot \text{int11} + 0,3064 \cdot \text{int18} - 0,0844 \cdot \text{БФО16} + \\ + 0,0812 \cdot \text{БКС7} + 0,2683 \cdot \text{БКС18} - 54,7759.$$

Параметр v в классифицирующих функциях обозначает возраст обследованного человека. Параметр p кодирует пол обследованного: $p=1$ для женщин, $p=2$ для мужчин. Качество распознавания составило 78,5% [3].

С целью получения представления о факторах, обуславливающих формирование тех или иных психических состояний, исследуем результаты измерений параметров, отобранных для распознавания принадлежности психического состояния человека к диапазону нормы или патологии с применением метода главных факторов [4].

Для осуществления факторного анализа был применен пакет прикладных программ AtteStat (И.П. Гайдышев, 2001, lic. Microsoft Part No. 001-001-0021RU)

Полученные факторные отображения в форме гистограмм приведены на рисунках 1-4.

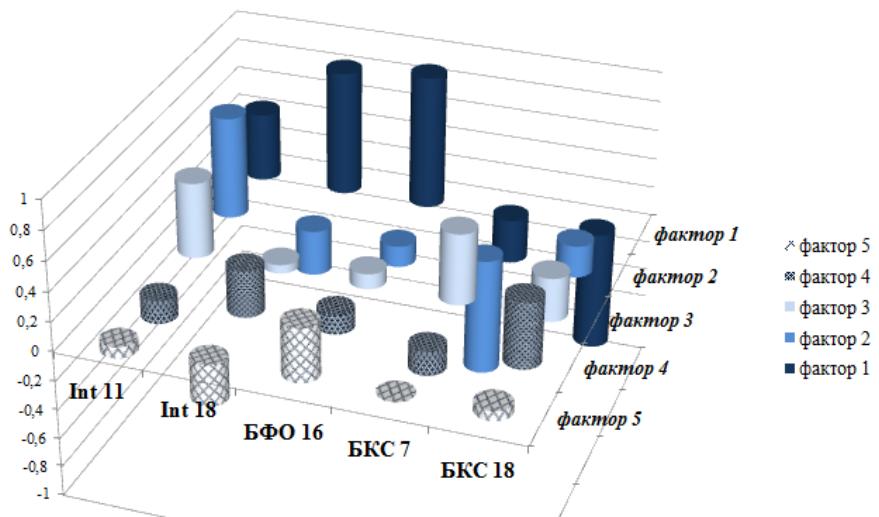


Рисунок 1 – Факторное отображение для пациентов с экзогенными психическими расстройствами

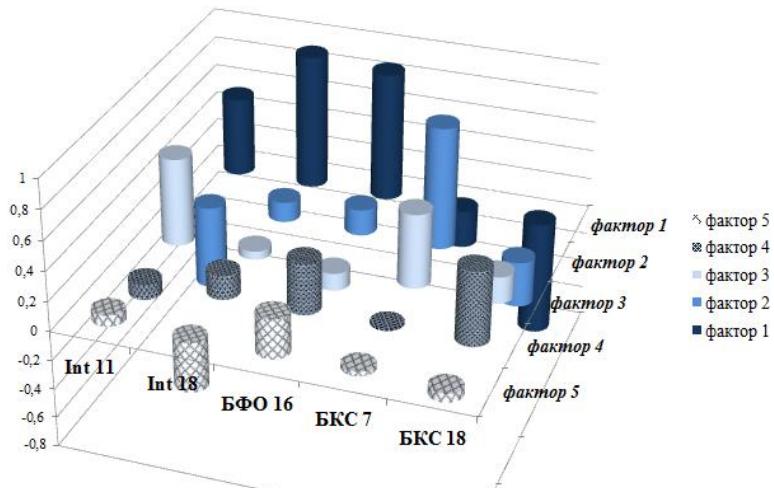


Рисунок 2 – Факторное отображение для пациентов с эндогенными психическими расстройствами

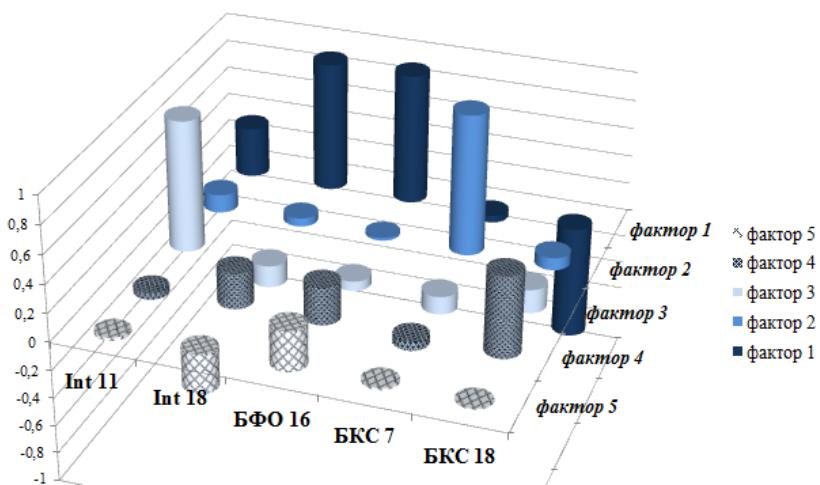


Рисунок 3 – Факторное отображение для пациентов с психогенными психическими расстройствами

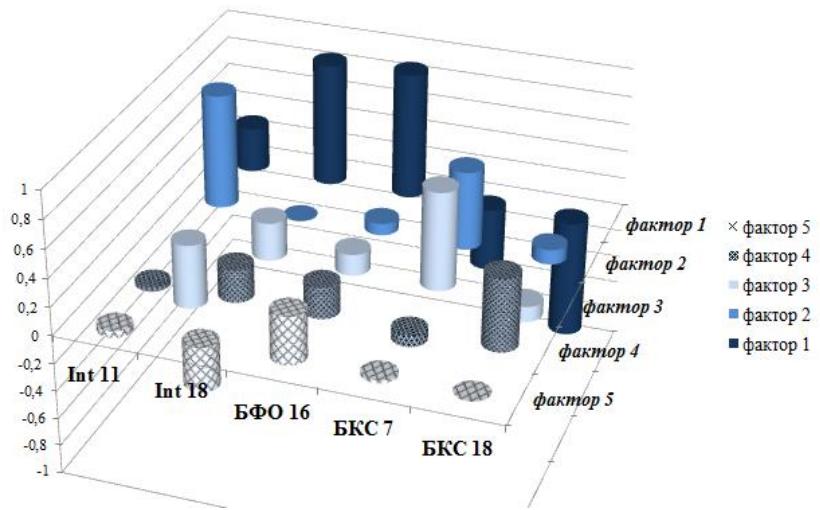


Рисунок 4 – Факторное отображение для группы контроля

Полученные факторные отображения позволяют сделать вывод, что факторы, воздействующие на организм человека при формировании патологий различного генеза и в норме весьма схожи, однако внутренние механизмы реакции организма на данные факторы, в одном случае обеспечивают возможность адекватного ответа, а в других ведут к образованию различных патологических состояний. Т.е. характер расстройства и сама возможность его развития определяются в большей степени свойствами психики человека как преобразователя сигналов, чем параметрами внешних воздействий. Однако, как показывает практика, внешние воздействия способны оказать влияние на данные механизмы реакции и существенно улучшить состояние пациента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Боев И.В., Золотарев С.В., Боев О.И., Ягода С.А., Кухарова Т.В. Способ дифференциальной диагностики психических расстройств эндогенного, экзогенного и психогенного происхождения на основе регистрации электродермальной активности / Патент на изобретение № 2455930; опубл. 20.07.2012. – Бюлл. № 20. – 22 с.
- 2.Уткин В. А. Статистические технологии в медицинских исследованиях: Монография, 2-е изд., испр., доп. – Пятигорск: ГНИИК ФМБА РФ, 2012. – 212 с.
- 3.Кухарова Т.В. Система оценки психического состояния человека и моделирование процесса лечения // Известия ЮФУ. Технические науки, 2014. – №10. – С. 15-24.
- 4.Уткин В.А., Гайдышев И.П., Кобазева О.М. О возможном единобразии приложений и условий реализации факторного анализа // Наука и образование Зауралья, 2001. – № 1. – С. 33-38.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПОЛЯМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛАХ АТОМНОГО РЕАКТОРА

Аннотация. В статье представлено описание системы контроля технологических параметров в активной зоне реактора АЭС РБМК-1000. Описана схема конструкции графитовой кладки активной зоны реактора. Рассмотрена методика моделирования объектов с распределёнными параметрами. Разработана методика математического моделирования распространения тепла в ячейке технологического канала. Разработанная методика позволит проводить диагностирование физического состояния энергоблока.

Ключевые слова: реактор, графитовая кладка, объекты с распределёнными параметрами, дифференциальное уравнение, моделирование, контроль, диагностирование, программно-техническое обеспечение, средства контроля, автоматизация приборов контроля.

Annotation. The article describes the control system of technological parameters in the reactor core of the RBMK-1000 NPP. A scheme for the design of the graphite core of the reactor core is described. The technique of modeling objects with distributed parameters is considered. A technique for mathematical modeling of heat propagation in a cell of a technological channel is developed. The developed technique will allow to diagnose the physical condition of the power unit.

Keywords: reactor, graphite masonry, objects with distributed parameters, differential equation, modeling, control, diagnostics. Software and hardware, control tools, automation of control devices.

Введение

Современная АЭС представляет собой совокупность различных элементов оборудования представляющих цепь сложных технологических связей, где происходят непрерывные процессы взаимосвязанных процессов преобразования, перераспределения и передачи различных видов энергии. Любое изменение технологического параметра, либо характеристики элемента оборудования в определённой степени влияет на параметры, характеристики и показатели работы всей системы. В процессе работы расходные и термодинамические параметры системы могут изменяться в пределах физически возможных и технически осуществимых изменений энергоносителей и конструкций, и находятся в пределах технически допустимых эксплуатационных состояний материалов оборудования. Это вызывает необходимость учитывать множество технических ограничений, проявляющихся в виде равенств и неравенств, являющихся необходимыми условиями нормальной эксплуатации системы. Современные атомные станции имеют высокий уровень надежности, что доказано наукой и временем. В то же время, приоритетом ядерной промышленности является обеспечение безопасности и уделяется самое пристальное внимание её совершенствованию. Огромная ответственность персонала атомных станций при работе с высокими технологиями, требует постоянно учитывать даже маловероятные риски возникновения аварии. Этому способствует непрерывный мониторинг состояния реакторной установки.

Рассмотрим мониторинг параметров реакторной установки на примере реактора РБМК-1000, установленного на множестве атомных станций, в том числе и на Ленинградской АЭС.

Описание реактора

Станция включает в себя несколько реакторов и представляет собой спецкомплекс зданий, где размещается необходимое технологическое оборудование [1]. В главном корпусе находится реакторный зал. Тепло в активной зоне реактора отводится теплоносителем и используется для получения водяного пара, который вращает турбину электрогенератора.



Рисунок 1 – Конструкция канального энергетического реактора РБМК-1000

Рассматриваемый реактор является гетерогенным канальным реактором с графитовым замедлителем и водяным кипящим теплоносителем. В качестве топлива используются уран-эрбьевые таблетки (диоксид урана UO_2 с добавкой оксида эрбия Er_2O_3). Реактор состоит из графитовой кладки замедлителя цилиндрической формы, которая размещается в бетонной шахте, через нее проходят специальные каналы системы управления и защиты, а также технологические каналы с ядерным топливом, охлаждаемые водой.

Реактор РБМК-1000 имеет две петли контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), расположенные симметрично относительно осевой плоскости реактора. Каждая петля включает два барабана-сепаратора и четыре циркуляционных насоса, прокачивающих воду через технологические каналы. Проходя через активную зону вода нагревается до температуры кипения. Основным элементом реактора является активная зона – это графитовая конструкция, где протекает управляемая ядерная реакция и куда загружается ядерное топливо.

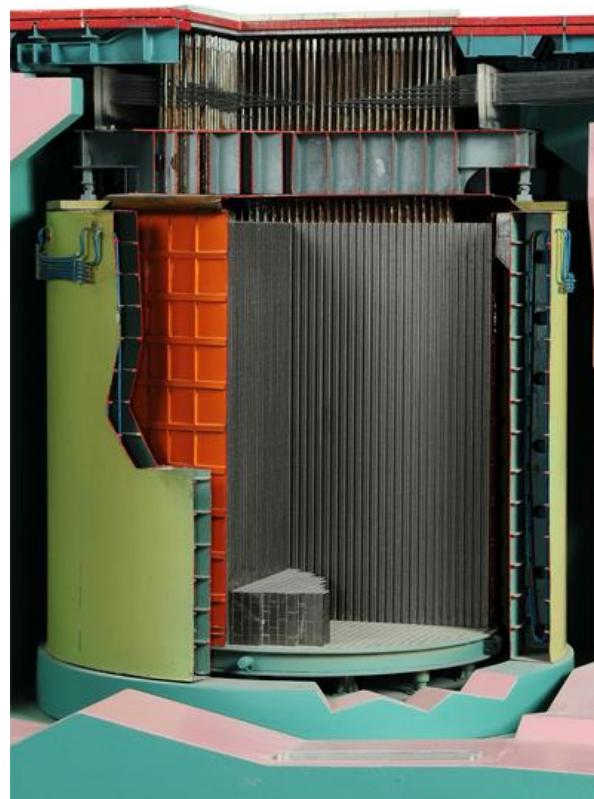


Рисунок 2 – Активная зона реактора

Главная задача безопасности реактора РБМК – постоянное поддержание необходимого охлаждения активной зоны. Подача теплоносителя в топливные каналы реактора в целях отвода тепла от тепловыделяющих сборок и от графитовой кладки осуществляется при помощи контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ). В канальных реакторах существует возможность контроля и регулирования расхода теплоносителя по каждому технологическому каналу. Это позволяет иметь минимально необходимый расход теплоносителя через реактор и получать на выходе всех каналов примерно одинаковые теплотехнические параметры. Для каждого канала необходимый расход определяется его мощностью, которая зависит от выгорания топлива и от места нахождения канала в реакторе. Во время эксплуатации мощность и требуемый расход теплоносителя изменяются постепенно, а при перегрузке топлива - скачкообразно. Теплоноситель подается в активную зону снизу по нижним водяным коммуникациям.

Регулирование расхода теплоносителя происходит при помощи запорно-регулирующего клапана (ЗРК). Регулирование расхода в технологическом канале (ТК) выполняется вручную. Управление запорно-регулирующим клапаном – довольно сложная и очень ответственная операция.

Операцию регулировки расхода воды в ТК производит оператор реакторного отделения.

Системы теплотехнического контроля реактора

Особенности теплотехнического контроля реакторов РБМК обусловлены доступностью для контроля любого из элементов реактора (включая элементы активной зоны), большим числом технологических каналов, каналов СУЗ, каналов охлаждения отражателя, разветвленностью циркуляционного контура и др.

К системам теплотехнического контроля относятся следующие системы контроля:

- температуры графитовой кладки;
- температуры тепловыделяющих элементов;
- температуры биологической защиты, металлоконструкций, бетона;
- поканального расхода теплоносителя и др.

Из общего числа точек (около семи тысяч) технологического контроля пять тысяч относятся к теплотехническому контролю, в который входят около трех тысяч точек контроля температуры и около двух тысяч точек контроля расхода теплоносителя и других теплотехнических параметров (давление, перепад давления, паросодержание и др.).

Из трех тысяч точек контроля температуры к штатным внутризонным температурным измерениям относятся 149 (85 - графитовая кладка, 64 - твэлы). Остальные измерения температуры касаются металлоконструкций, биологической защиты, контроля целостности ТК, сервоприводов СУЗ и др.

Почти все измерения проводятся с помощью кабельных термоэлектрических преобразователей (ТЭП) градуировки ХА и XK, выпускаемых по разработанному ГОСТу-23847-79.

Система контроля температуры графитовой кладки. Система контроля температуры графитовой кладки базируется на данных, получаемых от 17 термометрических многозонных сборок. Сборки устанавливаются в "угловых" температурных ячейках на стыке 4-х графитовых колонн. Ячейки расположены крестом по двум осевым диаметрам. На центральной оси 15 сборок (две из них в отражателе) и две ячейки на перпендикулярной оси в области плато реактора симметрично относительно центра кладки (Рис. 3).

Термометрические сборки весьма специфичны, что связано с большими размерами (высотой и диаметром) графитовых реакторов, с необходимостью обеспечения защиты персонала от облучения и условиями работы ТЭП в активной зоне. Сами чувствительные элементы (ТЭП) составляют лишь малую долю объема устройства.

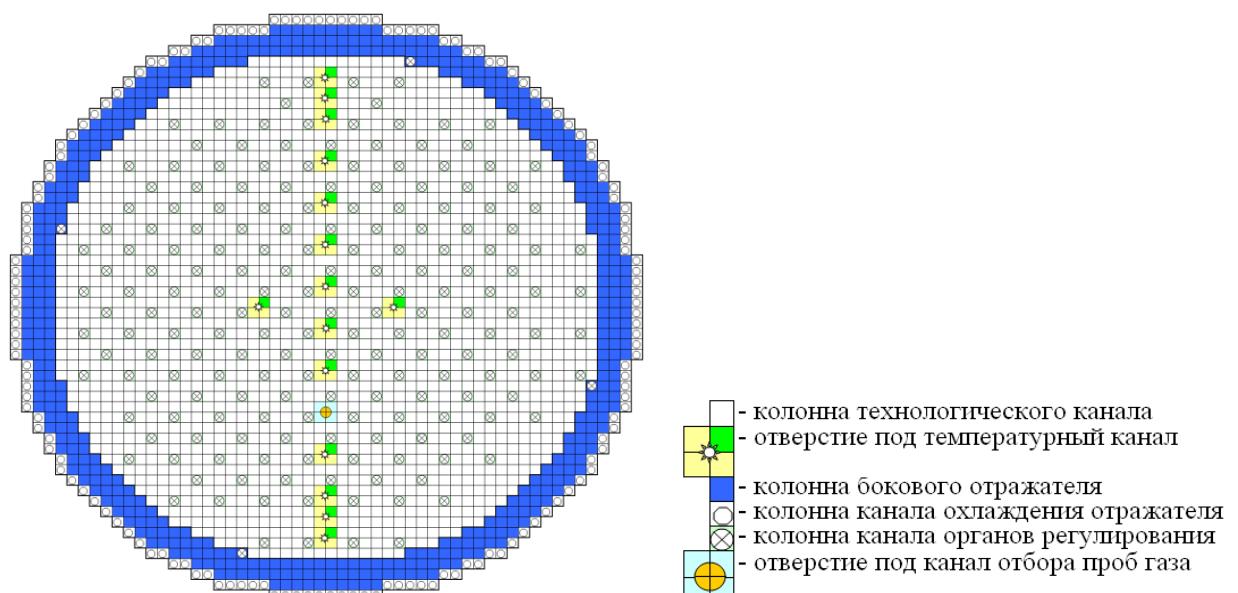


Рисунок 3 – Типовая схема расположения каналов в реакторе

Реакторы РБМК-1000 оснащаются блоками БТ-0170 с тремя кабельными ТЭП диаметром 5 мм, размещенными в отверстиях графитовых втулок. Втулки собраны на центральной несущей трубе. Труба, как и оболочки ТЭП, изготовлена из высоконикелевого сплава ХН78Т, стойкого к науглероживанию.

Измерительные спаи ТЭП блока размещаются на границах «горячих поясов» верхнего и нижнего, а также в средней части активной зоны, т.е. в местах возможного нахождения максимальной температуры кладки. Гарантированный ресурс таких сборок составлял 3 года, хотя экспериментальные сборки работали на некоторых реакторах и дольше. Вся термометрическая сборка с защитной пробкой, графитовыми втулками и тремя ТЭП представляет единый неразборный блок, который погружается в "угловые" ячейки.

Измерение температуры ТВЭЛОв. Термометрические ТВЭЛы, входившие в состав ТВС разрабатывались и изготавливались в процессе создания и совершенствования конструкций твэлов и ТВС и испытывались на промышленных реакторах и на РБМК. Термометрический ТВЭЛ имеет двойную циркониевую оболочку - внутри штатной оболочки твэла РБМК (диаметром 13,6x0,65) помещается оболочка ТВЭЛА ВВЭР (диаметром 9,1x0,35) с топливными таблетками повышенного обогащения. В зазор между оболочками устанавливаются на определенной отметке чувствительные элементы кабельных ТЭП, после чего зазор вакуумируется и заполняется расплавленным силумином. Вывод кабельных трасс осуществляется через переходник "сталь-цирконий". Такие термометрические ТВЭЛы используются для измерения температуры оболочек в термометрических кассетах (ТМК) в штатной системе теплотехнического контроля реакторов РБМК с 1986 г. Кроме того, с целью получения подробной информации о состоянии ТВЭЛОв РБМК-1500 были созданы измерительно-диагностические ТВС (ИДТВС). В состав ИДТВС входят ТВЭЛы, в которых измеряются следующие параметры:

- температура оболочки ТВЭЛА;
- температура в центре топливных таблеток;
- внутритвэльное давление;
- удлинение топливного столба;
- температура оболочки и локальные значения теплового потока (термотеплометрический ТВЭЛ).

Измерение температуры парогазовой смеси. В реакторах РБМК система аварийной защиты по разрыву технологического канала (ТК) в реакторном пространстве действует по повышению давления в реакторном пространстве и на выходе парогазовой смеси из него. Для

дублирования этого сигнала сигналом датчика, основанного на ином принципе действия, применительно к системе парогазовых сбросов (ПГС) реакторов РБМК был разработан блок термоэлектрических преобразователей (БТ), содержащий четыре независимых ТЭП кабельного типа переменного диаметра.

Быстродействие БТ практически не отличается от быстродействия датчиков давления. Динамическая прочность блока термоэлектрических преобразователей при скоростях потока до 300 м/с и температуре 400°C обеспечивается [4].

Анализ объекта и синтез системы управления

Мониторинг параметров реакторной установки связан с необходимостью анализа непрерывных физических процессов, протекающих в активной зоне. При анализе ядерных установок важная роль принадлежит расчету тепловыделяющей системы. Рассмотрим реактор атомной электростанции как систему с распределенными параметрами. Применим методы теории СРП для анализа процессов в активной зоне и синтеза систем управления этими процессами. Это позволит применить для управления процессами распределенный регулятор. Передаточная функция распределенного высокоточного регулятора имеет вид [3]:

$$W(x, y, p) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + E_2 \cdot \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot p.$$

где: E_1, E_2, E_3 - коэффициенты усиления;

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

- лапласиан;

n_1, n_2, n_3 - весовые коэффициенты.

Для разработки математической моделью применим выведенное на основе первого закона термодинамики уравнение теплопроводности.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к графитовой кладке:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} &= a_\Gamma \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \\ &+ \frac{a_\Gamma W_\Gamma}{\lambda_\Gamma V_\Gamma}, \end{aligned}$$

где a_Γ – коэффициент температуропроводности графита;

x, y, z – пространственные координаты;

W_Γ - мощность, выделяемая при торможении нейtronов;

λ_Γ - коэффициент теплопроводности графита;

V_Γ - объём графитовой кладки.

Уравнение теплопроводности при анализе тепловых процессов в технологических каналах, удобнее записывать в цилиндрических координатах.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к циркониевой трубе.

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_\Gamma \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right]$$

где a_Γ – коэффициент температуропроводности циркония.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к теплоносителю в канале:

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_T \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right] - g(R, t) \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y},$$

где g - скорость движения теплоносителя в канале;

a_T - коэффициент температуропроводности теплоносителя.

Запишем дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к выбранной ячейке графитовой кладки в цилиндрических координатах.

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_T \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right] + \frac{a_T W_T}{\lambda_T V_T},$$

В разработанной математической модели присутствуют уравнения, записанные в прямоугольной и цилиндрической системе координат. Для ихстыковки были выделены зоны цилиндрической формы в графитовых блоках, они совпадают с границами сквозных отверстий в графитовых блоках. Для этих зон были составлены дополнительно дифференциальные уравнения теплопроводности.

При моделировании рассматривались тепловые процессы, протекающие в графитовой кладке, состоящей из графитовых блоков. В технологическом канале располагается тепловыделяющая сборка, которая омывается теплоносителем. Положения ЗРК будем рассматривать как функции входа, а контрольные точки во внутренних зонах технологических каналов как функции выхода. Для мониторинга температуры в контрольных точках установим датчики температуры в каждом технологическом канале. Это позволит автоматизировать процесс регулирования расхода теплоносителя.

Для регулирования расхода теплоносителя и управления температурным полем активной зоны канального реактора предлагается использовать распределенный высокоточный регулятор (РВР). Проектирование распределенной системы управления позволит значительно повысить скорость реакции при возможных отклонениях параметров активной зоны реактора [4]. Структурная схема системы управления ЗРК с применением РВР представлена на рис. 4.

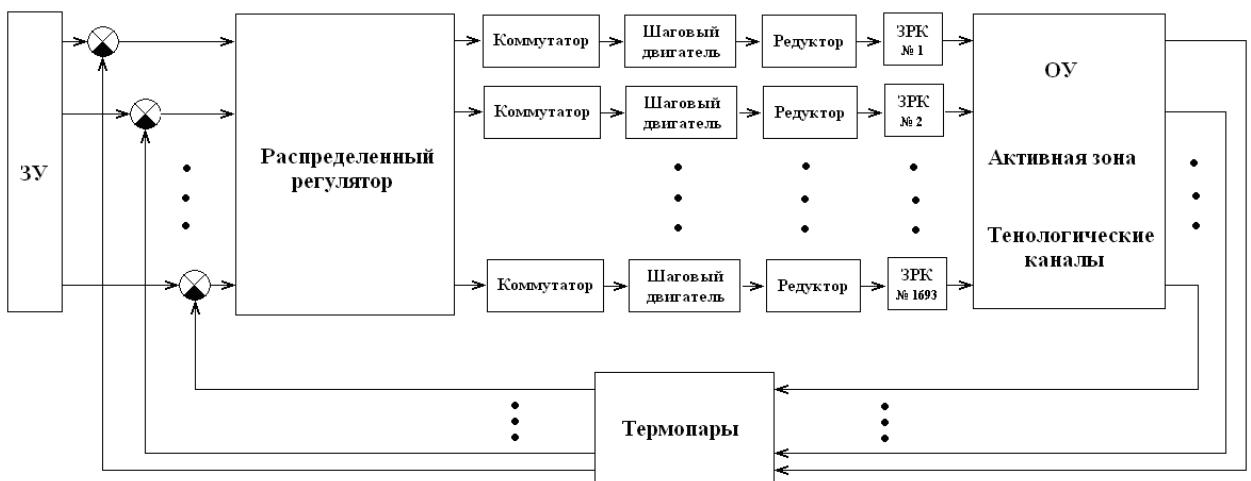


Рисунок 4 – Структурная схема

Математическая модель объекта управления описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, не имеющих аналитического решения, но, используя

дискретную модель объекта управления, определим реакцию объекта на выбранные пространственные моды входного воздействия.

Для проведения частотного анализа разложим входное воздействие $U(x,z,t)$ в ряд Фурье. Входное воздействие, учитывая граничные условия, может быть представлено в виде:

$$U(x,z,t) = L_3 + 0.1 \cdot L_s \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x_i) \cdot \sin(\bar{\Psi}_\gamma \cdot z_j)$$

где : L_s - размер внутреннего диаметра трубы, L_3 - текущее положение заслонки,

Найдем реакцию объекта на каждую составляющую ряда. Эту реакцию будем искать в виде:

$$T_{\eta,\gamma}(x,y,z,t) = H_{\eta,\gamma}(y,t) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x) \cdot \sin(\bar{\Psi}_\gamma \cdot z)$$

Для анализа объекта управления и расчета настроек регулятора будем использовать специально разработанное программное обеспечение. На рис. 5. представлено стартовое окно программы.

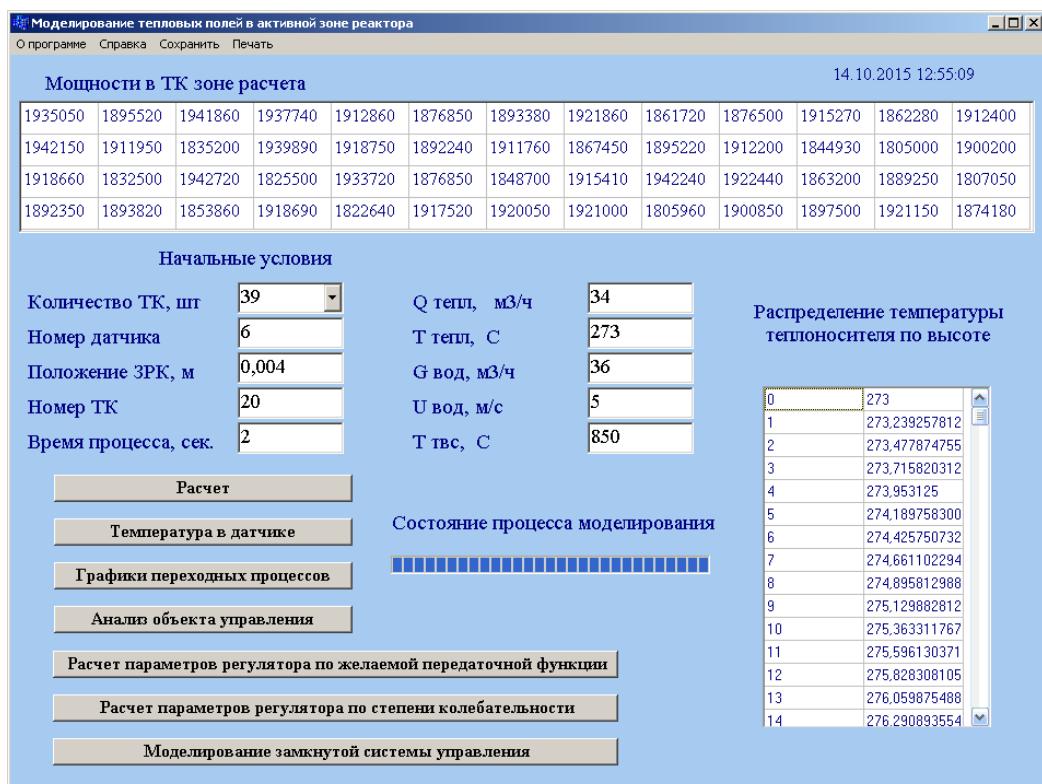


Рисунок 5 – Стартовое окно программы

Запишем желаемую передаточную функцию. Её параметры обусловлены требованиями к качеству переходного процесса, требуемого нормативными документами ЛАЭС.

$$W_{\eta c}(G, p) = \frac{E_{\eta c} \left[\frac{n_{\eta c} - 1}{n_{\eta c}} + \frac{1}{n_{\eta c}} \cdot G \right]}{T_{\eta c} \left[\frac{n_{\eta c} - 1}{n_{\eta c}} + \frac{1}{n_{\eta c}} \cdot G \right] \cdot p + 1}$$

$$W_{\eta c}(G, p) = \frac{0.7407 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} + \frac{1}{56.3897} \cdot 5.9841 \right]}{0.3711 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} + \frac{1}{56.3897} \cdot 5.9841 \right] \cdot p + 1} \cdot e^{-0.1002p}$$

Используя методику представленную в [5] произведем вывод передаточной функции распределенного регулятора для объекта.

Запишем передаточную функцию распределенного регулятора.

$$W_p(G, p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]} \cdot \frac{1}{p} + \frac{0.5\tau_{\text{ж}}^2}{T_{\text{ж}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{\text{ж}}} \cdot p \right)$$

$$K_p = \frac{T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]}{E_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] \left(T_{\text{ж}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{\text{ж}} \right)}$$

Для расчетов параметров используем разработанное программное обеспечение. Подставим в передаточную функцию полученные численные значения параметров.

$$W_p(G, p) = K_p \left(1 + \frac{1}{0.5227 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right]} \cdot \frac{1}{p} + \right.$$

$$\left. + \frac{0.5 \cdot 0.1002^2}{0.3711 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right] + 0.1002} \cdot p \right)$$

$$K_p = \frac{0.5227 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right]}{0.7594 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right] \left(0.3711 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right] + 0.1002 \right)}$$

Результаты моделирования показали, что управление в замкнутой системе реализуется в соответствии с заданными требованиями.

Заключение

При таком принципе контроля и управления расходом теплоносителя автоматизируется регулировка ЗРК, оперативный персонал осуществляет только контроль технологических параметров активной зоны. Регулирование расхода теплоносителя по каждому каналу позволит на выходе всех каналов получать одинаковые теплотехнические параметры и, соответственно, иметь минимально необходимый расход теплоносителя через реактор

По результатам численного моделирования, можно сделать вывод, что система осуществляет регулирование температурного поля с высокой точностью и в полном соответствии с поставленными требованиями. Применение РВР для управления параметрами рассматриваемого объекта позволяет проектировать системы управления сложными тепловыми процессами активной зоны реактора канального типа, обеспечивая при этом безопасность эксплуатации АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. Под общей редакцией Ю.М. Черкашова. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. – М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. – 632С.

2. Морева С.Л., Ляшенко А.Л. Математическое моделирование тепловых процессов в активной зоне реактора // Научное Обозрение. - Москва.: Изд. ООО «АПЕКС-94», - № 2.-2012. – С. 182-188.
3. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск, 2002. – 212с.
4. Лысиков Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходометрия ядерных реакторов. М., Энергоатомиздат 1998, 120 с.
5. Ляшенко А.Л Разработка передаточной функции распределенного регулятора, Научный журнал «Научное обозрение» №3, 2013, с. 89 – 90

*Макаров Анатолий Михайлович (1),
Мулкиджанян Павел Погосович (2), Постовалов Степан Сергеевич (2)*

1. Пятигорский государственный университет
2. Северо-Кавказский федеральный университет

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ИНТЕГРИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ ОХРАНЫ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. В работе рассмотрены особенности построения комплексных систем безопасности объектов хранения и обработки информации, а также сохранности материальных ценностей. Показано преимущество средств интегрированной системы безопасности, как эффективная система комплексного подхода защиты объектов.

Annotation. The paper discusses the features of building complex systems of safety of objects of storage and processing of information and protection of material values. The advantage means integrated security systems, as an efficient integrated approach for the protection of objects.

Введение

В последнее время идет бурное развитие систем обеспечения безопасности. Наиболее развивающийся сегмент рынка в этом направлении – технические средства охраны. Это связано как с разработкой нового оборудования, превосходящего по возможностям предшествующие аналоги, развитием компьютерной техники, так и тем, что руководители предприятий все больше осознают экономические и функциональные преимущества внедрения технических средств.

Другой быстроразвивающийся сегмент – интегрированные (комплексные) системы обеспечения безопасности. Такие системы позволяют объединить разрозненные системы безопасности, такие как СКУД, ОПС, подсистему видеонаблюдения, в единый комплекс безопасности с возможностью управления, обработки и мониторинга всех подсистем в одном месте. Это позволяет сократить издержки по внедрению, поддержке и использованию подсистем, а также выводит обеспечение безопасности на новый уровень, позволяя внедрять интеллектуальные алгоритмы автоматической обработки и реагирования.

1. Интегрированные системы безопасности.

В настоящее время с развитием ИТ-технологий и повышения требованиям к охране объектов особой важности:

– объектов энергетического комплекса, вывод из строя которых может привести к техногенным катастрофам, соизмеримых с оружием массового поражения(атомные, тепловые и гидроэлектростанции, газораспределительные станции и т.д.);

– сохранению объектов силовых структур;

– научно-технических объектов;

– объектов представляющих государственные интересы, и т.д.,

Для охраны таких объектов активно внедряются интегрированные системы безопасности (ИСБ). Это связано с тем, что требования к уровню обеспечения безопасности постоянно растут и для их наиболее полного удовлетворения необходимо широко использовать средства автоматизации, автоматизированные системы управления, новые информационные технологии, которые позволяют интегрировать организационные и технические ресурсы для решения этих задач. Данные системы включают в себя:

– совместно функционирующие систему охранной и тревожной сигнализации;

– систему пожарной сигнализации и пожаротушения;

– систему контроля и управления доступом;

– систему охранного видеонаблюдения, а также ряд дополнительных подсистем, обеспечивающих защиту от различных видов угроз, возникающих на объектах. Область

применения ИСБ – обеспечение комплексной безопасности больших, средних и особо важных объектов.

Использование ИСБ позволяет решить на новом качественном уровне задачи по обеспечению безопасности граждан и охраны собственности, повысить эффективность действий службы охраны и, тем самым, потенциально может свести ущерб к минимуму в тех случаях, когда он неизбежен.

К созданию комплексной системы безопасности необходимо применить комплексный подход.

При создании комплексной системы безопасности, её проектировании и в дальнейшем монтаже эффективнее использовать именно комплексный подход. Чтобы осуществить эффективное использование системы безопасности нужно на каждую часть системы (т.е на каждую подсистему) на входе и внутри здания ставить нескольких охранников. Но и при этом не исключено влияние человеческого фактора Проще говоря, если вы это сделаете, то все равно не сможете обеспечить 100% безопасность вашего объекта. Важно организовать защиту и контроль на всех уровнях, и комплексный подход позволяет сделать это максимально успешно.

Какие же преимущества даёт комплексный подход к организации системы безопасности? Комплексный подход даёт следующие преимущества:

Интегрированность. Все выше перечисленные подсистемы, составляющие систему безопасности при комплексном подходе связаны между одним типом интерфейса. Таким образом создается интегрированная среда обмена сигналами между различными элементами – контроллерами подсистем. В следствии этого все подсистемы работают в комплексе, выполняя одновременно функции контроля, сдерживания, обнаружения опасности, ее оценки и реагирования на нее, обеспечивая защиту сразу по нескольким направлениям.

Надежность. При проектировании комплексной системы безопасности обязателен грамотный и продуманный подход ко всем деталям системы. Нельзя упустить ни одной важной составляющей. В случае правильного проектирования и подхода к созданию системы безопасности исключается человеческий фактор (усталость, невнимательность), поэтому такой подход обеспечивает высокий уровень надежности и защищенности.

Оперативность. Так как комплексный подход к системе безопасности использует в качестве объединяющей системы шину данных в виде общего интерфейса – это позволяет добиться высокой скорости передачи данных даже в том случае, если разные системы защиты будут срабатывать одновременно. Моментальное реагирование – залог своевременного отклика на произошедшее событие.

Создание современных систем безопасности требует комплексный подход к данной задаче.

Задачу моделирования таких систем осуществляется моделированием пространственно-температурных полей.

ГЕНЕРАЦИЯ ПОЛЯ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПОМЕХ.

Для данной задачи моделирования необходимо получить ряд случайных значений с заданной корреляционной функцией вида $\sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos(\omega_0 |\tau|)$. Сделать это можно, преобразовав ряд нормально распределенных случайных чисел при помощи формирующего фильтра, описанного в монографии С.А. Прохорова [Л.4].

Для формирования поля будет использован ряд полученных таким образом случайных процессов с различными предопределенными зернами генерации, что позволяет получить поле нужного размера, обладающее характеристиками использованных для ее создания процессов в определенном направлении [Л.5].

Как входные данные для фильтров был использован нормально распределенный ряд с нулевым математическим ожиданием и дисперсией=1 с количеством значений 10^4 , его корреляционной функцией является σ -корреляция и автокорреляционная функция каждого ряда значений выглядит, как на рис.1.

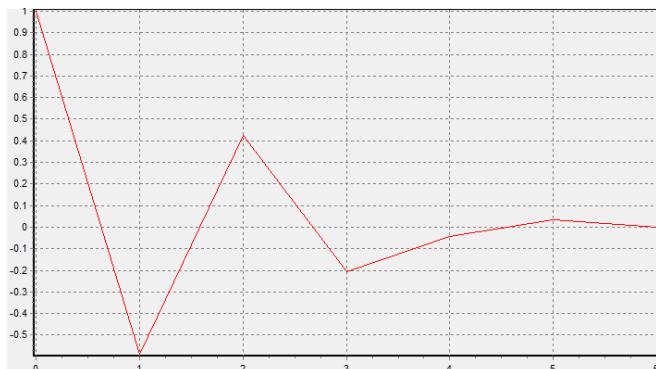


Рисунок 11 – Корреляционная функция

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С ЗАДАННОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИЕЙ

Входные данные:

Коэффициент корреляции α . Для данной функции наиболее гармоничный сигнал дает коэффициент 0,3-0,2;

Шаг функции Δt ;

Частотная характеристика функции w_0 ;

Ряд случайных нормально распределенных чисел с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Внутренние предварительные вычисления:

$$Y = \alpha \Delta t;$$

$$Y_0 = w_0 \Delta t;$$

$$p = e^{-Y};$$

$$a_0 = p(p^2 - 1) \cos Y_0;$$

$$a_1 = 1 - p^4;$$

$$a_0 = \sqrt{(a_1^2 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0^2})/2}$$

$$a_1 = a_0/a_1;$$

$$b_1 = 2p \cos Y_0;$$

$$b_2 = -p^2.$$

Все значения, вычисляемые дважды либо вызывающие сами себя в вычислениях, следует воспринимать как «новое значение»=f(«старое значение»).

Моделирующий алгоритм данного фильтра:

$$y_n = a_0 x_n + a_1 x_{n-1} + b_1 y_{n-1} + b_2 y_{n-2}.$$

Особенностью данного фильтра является наличие переходного процесса в начале, вносящего искажения, от которого необходимо избавиться – убрать лишние значения в начале. Делать это необходимо точно, поскольку каждое лишнее значение сильно искажает корреляционную функцию(рис.2).

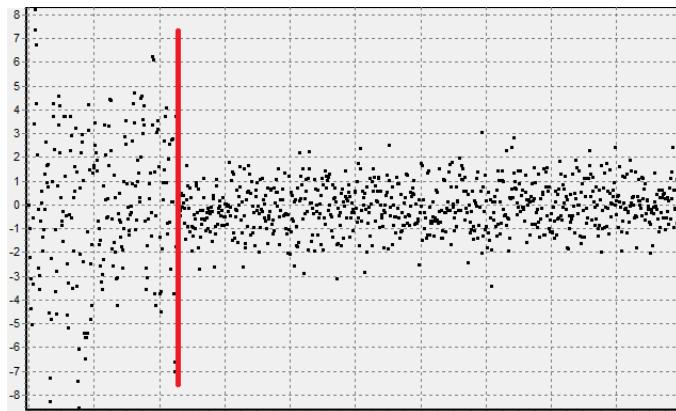


Рисунок 2

Значения слева от черты здесь – переходной процесс.

Из-за утраты от переходного процесса и просто для увеличения четкости корреляционной функции рекомендуется брать 10^4 значений.

Примерно так должна выглядеть корреляционная функция данного фильтра без переходного процесса(рис.3):

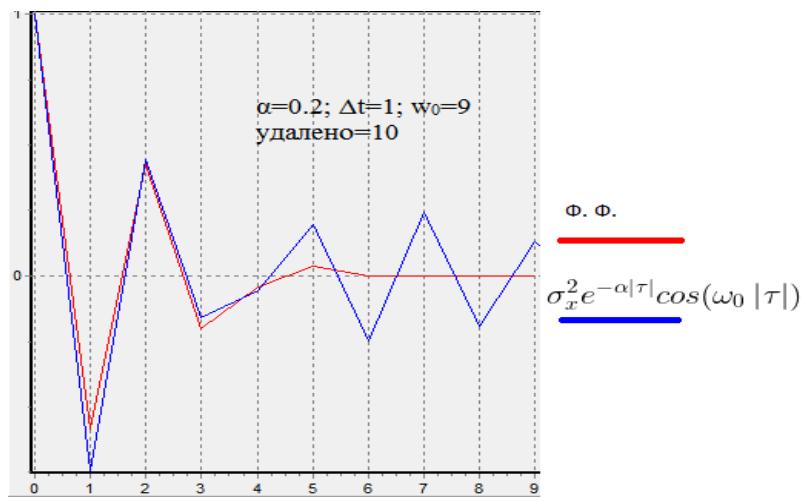


Рисунок 3

Для получения поля случайных чисел были взяты сформированные вышеуказанным способом ряды случайных чисел с различными зернами генерации, что дало следующую демонстрационную поверхность корреляционной функции для поля длиной в 10^4 значений и шириной в 30 рядов с различными зернами генерации случайных чисел(рис.4):

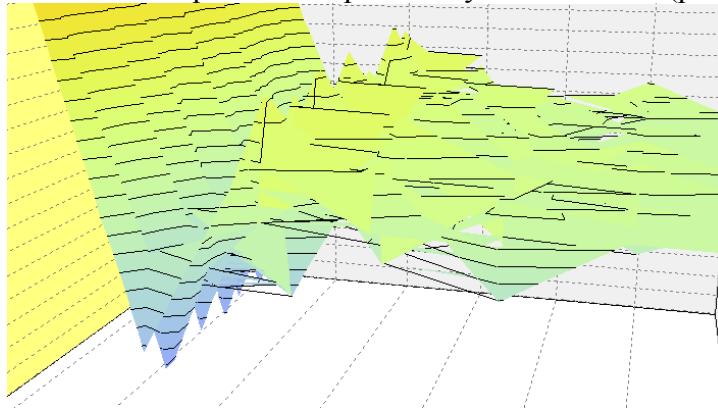


Рисунок 4 – Поле корреляционных функций для совокупности рядов случайных чисел.

Для снятия спектральных данных с этого поля необходимо использовать преобразование Фурье вида:

$$\sigma(w_1, w_2, w_3) = \iiint U(x, y, t) e^{-jw_i(x, y, t)} dx dy dt$$

к корреляционной функции сигнала для получения спектральной плотности.

Вывод: предложенный алгоритм формирования поля положен в основу дальнейших исследований распределенных в пространстве систем на их устойчивость к случайным возмущениям.

Заключение

Для создания необходимого уровня защиты объектов хранения и обработки конфиденциальной информации, сохранности имущества и материальных активов, на объектах

устанавливаются охранные линии различного типа. Защитное оборудование может быть автономным (индивидуальным) и комплексным. Чтобы организовать полномасштабный контроль над происходящими событиями, на охраняемом периметре в последнее время используются интегрированные системы безопасности. ИСБ представлены в виде совокупности технических (аппаратных) и программных средств, которые имеют общую платформу.

Интегрированная система безопасности обязательно проектируется. Перед проектированием производят обследование объекта на предмет индивидуального характера объекта и принятие решения комплекса защитных подсистем, которые в последствии, в ходе проектирования, объединяются в единый комплекс защиты объекта. В зависимости от конструкторских или инженерных особенностей охраняемой территории, может устанавливаться дополнительное оборудование или, наоборот, какая-либо подсистема может быть исключена из состава комплекса.

Создание комплексных систем безопасности стало новым этапом в сфере обеспечения охраны объектов. Объединение нескольких типов оборудования в целостный комплекс позволяет:

Снизить затраты по оснащению объекта охранным оборудованием за счет уменьшения количества устанавливаемых механизмов и программных модулей;

Уменьшить количество поступающей системному администратору информации, а тем самым упростить его работу и сделать ее более эффективной и качественной;

Автоматизировать принятие решений и передачу команд при возникновении типичной ситуации на подконтрольном периметре;

Значительно минимизировать вероятность выполнения неправильных (ошибочных) действий со стороны оператора комплекса;

Повысить уровень защиты охранного оборудования от внешнего воздействия.

Обязательным принципом построения комплексной охранной линии является наличие единого (централизованного) канала обмена информацией, общего программного обеспечения и технических средств. На сегодняшний день ИСБ в основном применяются на объектах различного масштаба, которые требуют повышенного уровня безопасности. Также широкое распространение получили линии безопасности в УИС (уголовно-исполнительной системе). Принципы их построения аналогичны алгоритму организации систем на других объектах народного хозяйства.

Интегрированные комплексы имеют запрограммированные интеллектуальные алгоритмы действий, которые исключают возможность ложного срабатывания оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексные системы безопасности – гарантия стабильной работы и непрерывности бизнес-процессов _ www.kr.ru
2. Интегрированная система безопасности: классификация защитных комплексов
Информация взята из: <http://camafon.ru/sistemyi-bezopasnosti/integrirovannye>
3. Комплексные системы безопасности – гарантия стабильной работы и непрерывности бизнес-процессов _ «Ви энерджи». Белгородская Инженеринговая Компания.
4. Прохоров С.А. Математическое описание и моделирование случайных процессов, Монография, СНЦРАН_2001г.
5. Моделирование нормально-распределенных полей с заданной корреляционной функцией. А.М. Макаров, И.В. Калиберда, С.С. Постовалов _, Современная наука и инновации._ 2016. № 3 (15). С. 44-51.

*Першин Иван Митрофанович (1), Малков Анатолий Валентинович (2),
Помеляйко Ирина Сергеевна (1)*

1. Северо-Кавказский федеральный университет
2. Общество с ограниченной ответственностью «Нарзан-гидроресурсы»

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В КУРОРТНЫХ РЕГИОНАХ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Аннотация. Выполненный системный анализ экологического состояния природных сред курортов КМВ выявил основные факторы, негативно влияющие на экологическую ситуацию (ЭС). По степени экологического неблагополучия Железноводск и Ессентуки отнесены к территориям с напряженной ситуацией, Кисловодск и Пятигорск с критической ЭС. Выполненный анализ позволил установить степень защищенности различных площадей месторождений, оценить порог, обеспечивающий бактериологическую безопасность участков, наметить конкретные мероприятия по защите кважин. Разработаны агрегатные критерии, на основе которых осуществляется оптимизация числа добывающих скважин. Рассмотрено формирование целевых функций для систем управления гидролитосферными процессами, разработаны общие принципы проектирования систем управления. Проблема управления данными процессами требует перехода на принципиально новую концепцию – обеспечение технологической и экологической безопасности эксплуатации гидро-минеральной базы и региона в целом.

Ключевые слова: курортный регион, системный анализ, экологическая ситуация, управление, целевые функции.

Annotation. The system analysis of the ecological state of the natural environments of the resorts of the CMW revealed the main factors that adversely affect the ecological situation (ES). According to the degree of ecological problems, Zheleznovodsk and Yessentuki are attributed to territories with a tense situation, Kislovodsk and Pyatigorsk with a critical ES. The performed analysis made it possible to establish the degree of protection of various areas of the fields, estimate the threshold ensuring bacteriological safety of the sites, and outline concrete measures to protect captures. Developed by aggregate criteria on the basis of which the optimization of the number producing wells. The formation of target functions for control systems of hydrolytospheric processes is considered, general principles of design of control systems are developed. The problem of managing these processes requires a transition to a fundamentally new concept – ensuring technological and environmental safety of the operation of the hydromineral base and the region as a whole.

Keywords: resort region, system analysis, ecological situation, management, target functions.

Введение

Как известно, система – декартово пересечение множеств, множества входных воздействий Х и множества функций выхода У. Объект исследования может быть любым [1]. В данной статье, в качестве агрегатной функции выхода рассматривается состояние человеческого организма, определяемое множеством факторов, а входным воздействием – климатические условия курорта, его экологическое состояние и совокупность курортных процедур. Размерность рассматриваемой системы может быть сколь угодно большой. Структурная схема взаимосвязей экологической обстановки, состояния здоровья населения и ряда других факторов приведена на рис.1.

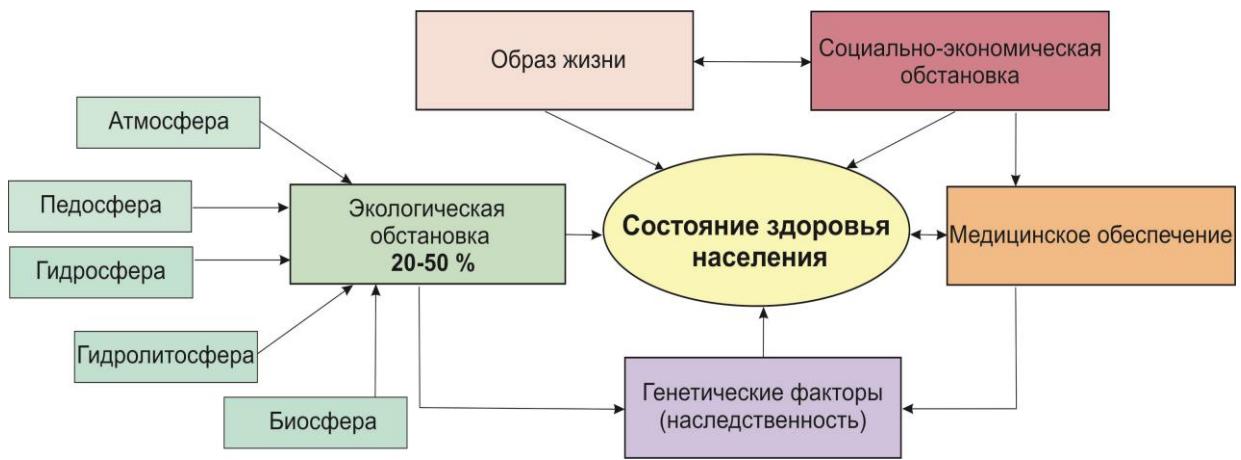


Рисунок 1 – Структурная схема взаимосвязей экологии, состояния организма и гидролитосферных процессов курорта

Глобальная целевая функция – желаемое состояние человеческого организма после окончания оздоровительных, лечебных процедур. Достижение глобальной целевой функции осуществляется с помощью локальных систем мониторинга и управления (рис.2).

Целеполагание системы мониторинга и управления экологическим состоянием среды – сохранение среды обитания, благоприятной для эффективного функционирования оздоровительного и туристского комплексов.

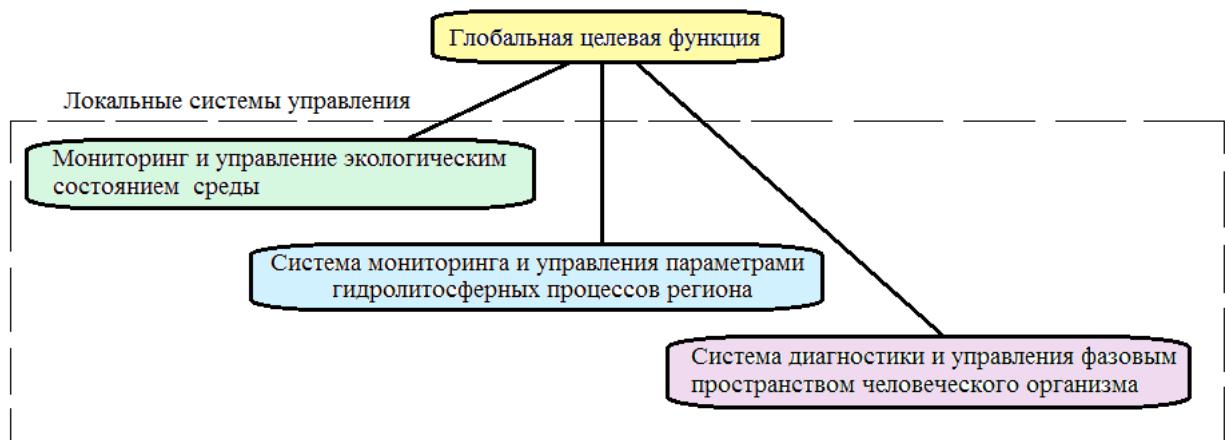


Рисунок 2 – Локальные системы мониторинга и управления

Целеполагание системы мониторинга и управления параметрами гидролитосферных процессов – сохранение гидроминеральной базы региона

Целеполагание системы диагностики и управления фазовым пространством человеческого организма – приведение заданных параметров организма к желаемому состоянию. Отдельные элементы такой системы реализованы. Реализация системы в целом потребует больших исследовательских работ специалистов различных областей знаний.

Сфера природопользования является весьма значимым пространством проявления, реализации и согласования экономических интересов региона Кавказских Минеральных Вод. Уникальное сочетание бальнеологических ресурсов – климата, лечебной грязи, минеральных питьевых и термальных вод, а также горных ландшафтов, обеспечивает благоприятные условия для эффективного функционирования туристско-рекреационного комплекса. Кроме того, природопользование имеет особое значение в контексте реализации перспективных интересов южных регионов. Устойчивое социально-экономическое развитие региона невозможно без учета и реализации экономических интересов в сфере природопользования. Однако, если руководствоваться фактами о современном состоянии окружающей среды в СКФО, есть основание

говорить об абстрагировании от указанных интересов. Проведенный анализ за два последних десятилетия позволяет сделать вывод, что реальная картина гидролитосферы региона существенно отличается от ожидаемой [2,3,4,5]. Состояние гидроминеральной базы курортов КМВ особенно верхней гидродинамической зоны весьма неблагополучно. Из-за высокого загрязнения грунтовых вод, залегающие непосредственно под ними артезианские минеральные воды бактериально загрязнены, содержат повышенные концентрации тяжелых металлов, азотсодержащих соединений, нефтепродуктов, фосфатов и др. Большинство скважин и минералопроводов исчерпали свой амортизационный ресурс, так как введены в эксплуатацию ещё в XIX, в начале и середине XX веков, в связи с чем необходимо бурение скважин дублеров, проведение капитального ремонта каптажей источников и надкаптажных сооружений. Остановимся кратко на наиболее неблагополучных минеральных источниках региона КМВ. ЖЕЛЕЗНОВОДСК. В начале 80-х годов прошлого столетия, прекращена подача минеральной воды Баталинского месторождения в связи с появлением в ней ядохимикатов и бактериальным загрязнением. Во II зоне санитарной охраны, в грунтовых водах присутствуют чрезвычайно опасные концентрации марганца до 68 ПДК, лития до 22,8 ПДК и бора до 3,9 ПДК. ПЯТИГОРСК. Качество минеральной воды скважин Академическая 2, Теплосерная 1 и 3, Радиоштоллья 2, Народный и др. не стабильно по микробиологическим показателям в связи с чем не может использоваться для питья. В грунтовых водах зафиксировано повышенное содержание нефтепродуктов до 17,8 ПДК, марганца до 15 ПДК, бария до 18 ПДК, мышьяка до 3 ПДК, аммония до 20 ПДК, бора до 5 ПДК. За счет разубоживания существенно ухудшилось качество Тамбуканских грязей. ЕССЕНТУКИ. В связи с бактериальным загрязнением и потерей кондиций не используются для питьевых целей воды из четвертичного водоносного горизонта «Ессентуки-20», Гаазо-Пономаревский и др. В грунтовых водах зафиксировано содержание аммония до 20 ПДК, нитратов до 10 ПДК, бария до 28 ПДК, стронция до 10 ПДК, бора до 8 ПДК, фенолов до 70 ПДК. КИСЛОВОДСК. Микробиологическое состояние воды источника «Нарзан» ухудшается. В 90-х годах прошлого века доля неблагополучных проб составляла 65-90 % от общего их количества за год, в настоящее время – практически 100 %. В грунтовых водах в I зоне санитарной охраны присутствуют высокие концентрации стронция до 13 ПДК, железа до 49 ПДК, марганца до 15 ПДК, мышьяка до 2 ПДК, бария до 5 ПДК, алюминия до 4 ПДК. Вода скважины 5/0-бис входящей в ГОСТ 54316-2011 не может использоваться для питья, как в силу бактериологического загрязнения, так и в связи с полной потерей кондиций. В 2016 г. средние значения минерализации составили 1,1 г/дм³ (норма 2-3,5 г/дм³), растворенной углекислоты – 0,3 г/дм³ (норма 1,0-2,5 г/дм³). Скважина 5/0- представлена в ГОСТ 54316-2011 как Доломитный Нарзан не соответствует требованиям ни по основному ионному составу ни по минерализации 3,0 г/дм³ (норма 4,0-4,5 г/дм³) [3]. Источник «Нарзан» уже длительное время является бактериологически загрязненным, и используется исключительно для ванных процедур, да и то только после санации сернокислым серебром. Динамика качества минеральных вод (основные источники) приведена на графиках рис. 1,2.

Остаточные количества пестицидов (ГХЦГ, ДДТ), до сих пор применяемых на территории региона, присутствуют на всех месторождениях минеральных вод практически во всех водоносных горизонтах, в том числе и глубокозалегающих.

Приобретение КМВ статуса особо охраняемого эколого-курортного региона мало отразилось на улучшении экологической обстановки. Более того, рыночные отношения сняли многие запреты, ранее не подлежащие даже обсуждению. Санитарный режим в первой зоне горно-санитарной охраны (ГСО) курорта Кисловодск полностью не соблюдается. В настоящее время в первой зоне ГСО расположено 264 жилых домовладения, более 70 % из них приватизировано.

В основном это частный сектор, одно-двух этажной застройки не подключенный к городской канализации. Неканализованный жилой фонд в основном приурочен к водоохранным зонам рек, куда в частности и происходит сброс сточных вод. Часть сточных вод, учитывая повышенную трещиноватость известняков и песчаников валанжина, готерива и баррема, фильтруется в водоносные горизонты.

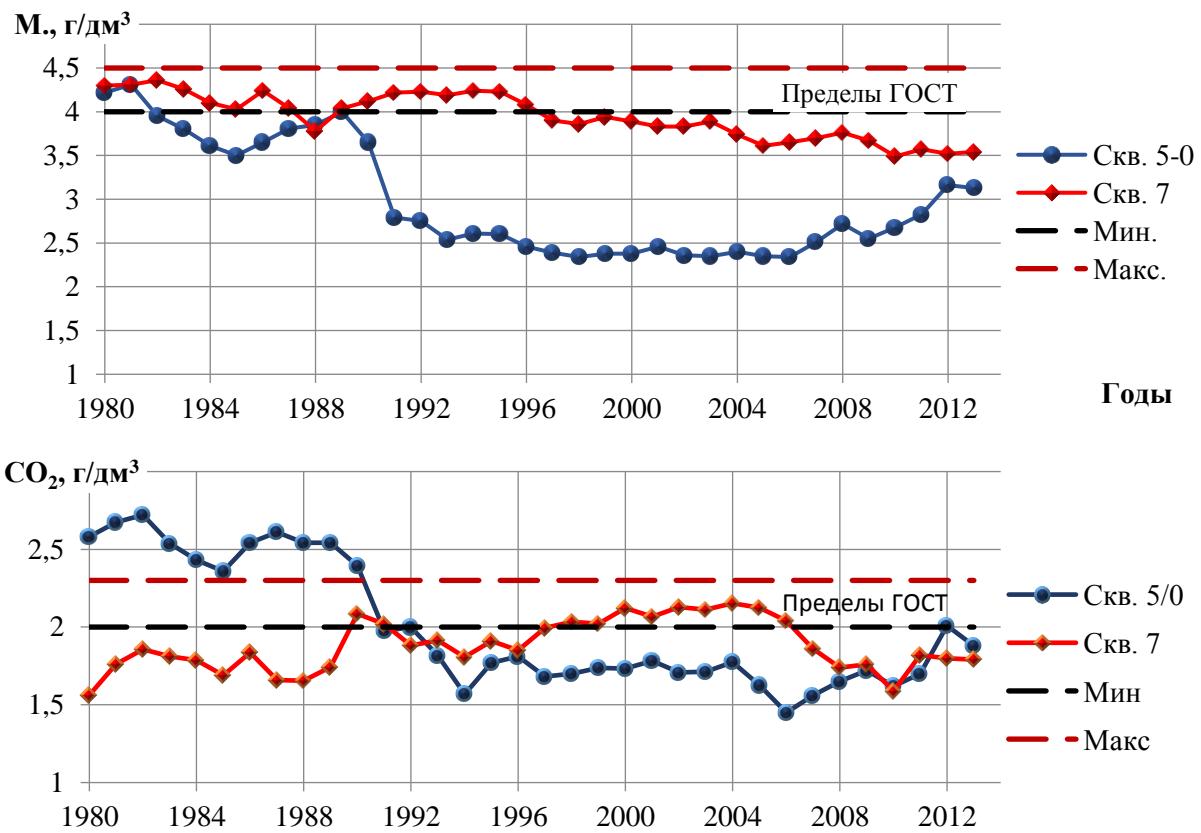


Рисунок 3 – Динамика минерализации и двуокиси углерода (CO_2) в ряде скважин Кисловодска

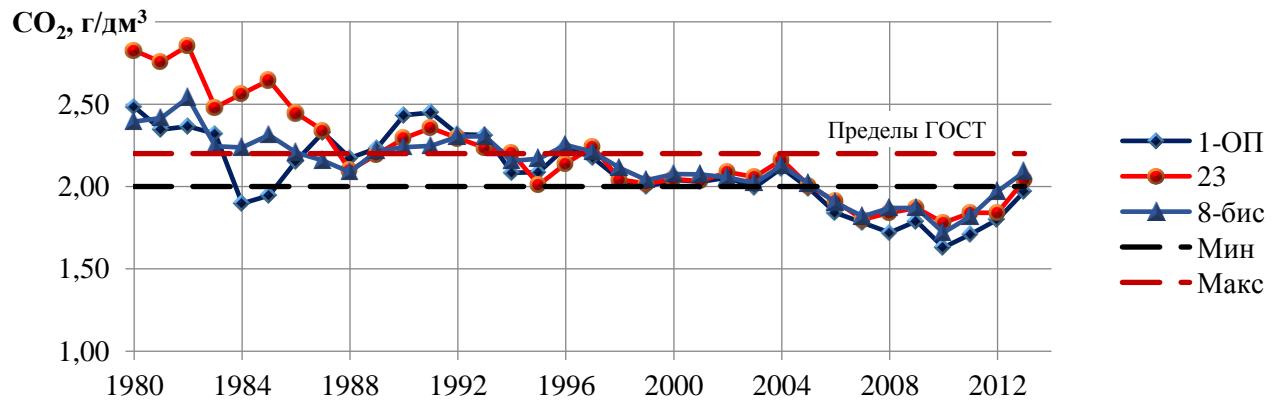


Рисунок 4 – Падение концентрации биологически активного компонента (CO_2) в Сульфатном Нарзане в г. Кисловодске

В 1-й зоне ГСО расположены около 40 объектов социально-культурного и бытового назначения. Вдоль, а порой и непосредственно на русле рек идет масштабное строительство жилых и торговых зданий [4]. Данное строительство нарушает естественную циркуляцию воздушных масс вдоль русел рек, что в условиях закрытой котловины приводит к накоплению загрязняющих веществ (ЗВ) в почвах, поверхностных водотоках и грунтовых водах.

В границах второй зоны ГСО расположено большое число объектов, не связанных непосредственно с нуждами курорта, в том числе и опасных загрязнителей – 13 объектов нефтепродуктообеспечения, склады ядохимикатов и удобрений, тепловая электростанция (ТЭЦ), железная дорога, трест зеленого хозяйства. Общая протяженность железной дороги на территории Кисловодска составляет около 5 км (из них 2 км. во 2-й зоне санитарной охраны) [5,6]. Не лучшим образом обстоят дела и в других курортных городах КМВ. Если раньше речь шла в основном только о коммунально-бытовом загрязнении грунтовых вод, являющихся основным источником

загрязнения нижележащих смежных водоносных горизонтов минеральных вод, то очевидно, следует ожидать в перспективе расширение перечня загрязняющих веществ;

Нельзя не отметить ситуацию с минеральными подземными водами горнодобывающих карьеров, где производилась разработка урановых руд (г. Лермонтов). Шахтные воды, обогащенные радоном, до сих пор изливают на рельеф и далее поступают в поверхностные и подземные воды, нанося непоправимый ущерб, как поверхностным, так и подземным источникам. Это касается всех вод, расположенных ниже по течению от г. Лермонтова и г. Пятигорска. Рекультивация отвалов и всех технологических объектов предприятия добычи урана конечно дала определенные результаты, но для подземных вод, расположенных в непосредственной близости от источников загрязнения горнорудного предприятия и ниже по потоку ситуация изменилась не очень существенно и по настоящее время эта проблема остается весьма актуальной.

В силу указанного, существует потенциальная опасность деградации месторождений минеральных вод. Степень вероятности такого исхода определяется совместным воздействием физико-химических процессов сорбции, диффузии, конвективного массопереноса, особенностями геолого-гидрогеологического строения гидролитосферы, климатическими факторами и режимами эксплуатации капитальных сооружений. В зависимости от соотношения этих процессов может происходить либо самоочистка исходящих потоков, либо заражение смежных водоносных горизонтов.

На сегодняшний день более десятка гидроминеральных источников безвозвратно потеряно. Аналогичные проблемы наблюдаются и в других регионах, богатых гидроминеральными источниками [7].

Необходимо принятие срочных мер, поскольку дальнейшая эксплуатация гидроминеральных источников КМВ в таком режиме может привести к развитию необратимых процессов, либо восстановление потребует больших финансовых затрат и длительных сроков реабилитации. Технологии, которые используются при добычи гидроминерального сырья, разработаны в позапрошлом веке, а системы управления эксплуатационными скважинами, во многих случаях имеют ручное управление.

Применение современных (распределенных) систем добычи гидроминерального сырья

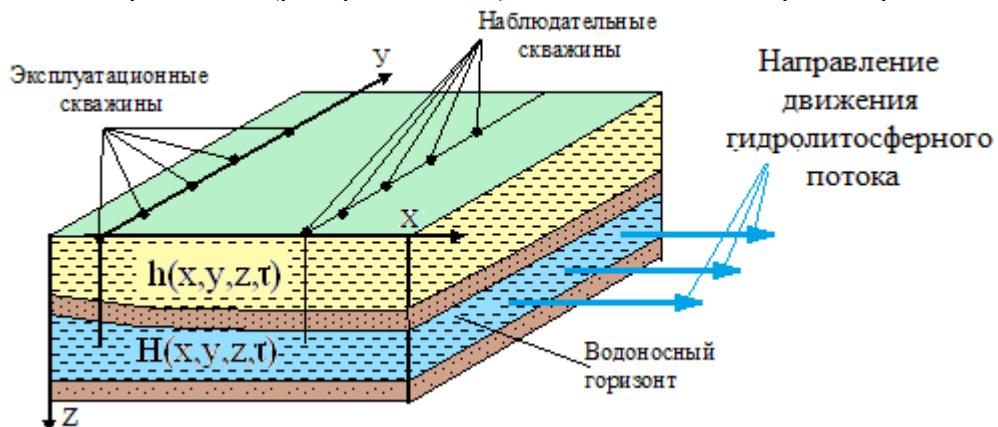


Рисунок 3 – Размещение скважин

Добывающие скважины следует размещать на линии, перпендикулярной «току» (движению гидролитосферного потока) в рассматриваемом месторождении (рис.3). Желательно, а при добычи свыше 100 м^3 , согласно п. 8 постановления Правительства РФ № 94 от 11 февраля 2016 г. «Об утверждении правил охраны подземных водных объектов» необходимо «водозаборы подземных вод с объемом добычи свыше 100 м^3 должны быть оборудованы наблюдательными скважинами». Рассмотренные выше проблемы в гидролитосфере требуют системного подхода для обеспечения технологической и экологической безопасности эксплуатации гидроминеральной базы и региона.

Проектирование системы управления. Целеполагание такой системы – сохранение гидроминеральной базы региона (например, региона Кавказских Минеральных Вод).

Процедура решения поставленной задачи:

- определение оптимального числа добывающих скважин [2,8,9];
- определение допустимых технологически безопасных режимов эксплуатации месторождений минеральных вод (определение целевых функций для систем управления параметрами месторождений) [8,10-12];
- организация системы контроля и мониторинга и управления ключевыми показателями добывающей отрасли [13-21];
- составление долгосрочных прогнозов развития процессов в гидролитосфере региона [2,18]. Техническая часть рассматриваемой системы представлена на рис. 5.

Существующие технические средства телеметрического сбора, накопления и передачи информации (например, комплекс Кедр – ДМ), установленные на эксплуатационных и наблюдательных скважинах позволяют вести мониторинг процесса эксплуатации в режиме реального времени и без непосредственного участия человека. Помимо этого, устройства сбора информации могут быть задействованы для контроля экологической ситуации воздушной среды региона. Это потребует оснащения системы приема-передачи данных дополнительными датчиками.

Информация от технических средств телеметрического сбора поступает на сервер и далее в вычислительный комплекс с помощью которого решаются следующие задачи:

1. *Первичная обработка данных* (системы сбора и контроля первичных показателей). На этом уровне решаются задачи:

1.1. Первичного контроля входных данных и анализа работы средств телеметрического сбора информации.

1.2. Верификация полученных данных и режимов эксплуатации рассматриваемых месторождений (определение пьезометрических уровней, дебитов, минерализации).

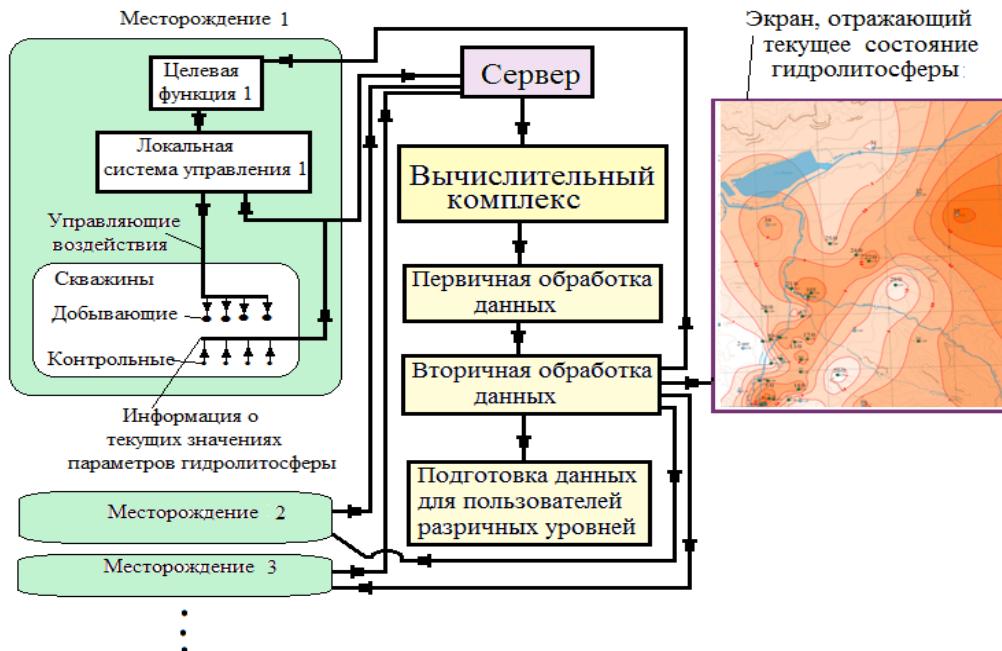


Рисунок 5 – Техническая часть решения поставленной задачи

1.3. Агрегирование данных, определение тенденций развития процессов и формирование статистической информации.

2. *Вторичная обработка данных* (представление информации о текущем состоянии дебитов и гидролитосферы региона). На этом уровне решаются задачи:

2.1. Используя данные первичной обработки, по математическим моделям восстанавливается общая картина пьезометрических уровней и минерализации гидроминерального сырья региона.

2.2. Определяются целевые функции для каждого из рассматриваемых месторождений минеральных вод (с использованием районирования месторождений, определяются целевые функции систем управления) и проектируются системы управления дебитом добывающих скважин.

2.3. Выделяются аномальные зоны и рекомендуемые способы устранения аномалий.

2.4. Определяются текущие и оптимальные дебиты добывающих скважин.

2.5. Сравниваются рекомендованные (оптимальные) дебиты добывающих скважин с текущими дебитами.

2.6. Осуществляется прогнозное моделирование развития гидролитосферных процессов региона.

2.7. Решается задача визуализации результатов вторичной обработки данных.

2.8. Определяется форма и вид предоставления информации по уровням исполнительной и законодательной власти.

Заключение. Технологически и технически не существует проблем, препятствующих решению поставленной задачи: – сохранения гидроминеральных источников региона. Проведена большая научная и исследовательская работа и разработаны:

– методика верификации математических моделей, описывающих динамику развития процессов и позволяющих оценить характер и тенденции в развитии гидролитосферы рассматриваемого региона, охватывающего периоды упреждения в несколько десятков лет;

– методы моделирования гидролитосферных процессов в регионе КМВ;

– методика определения оптимальных нагрузок на водоносные горизонты исходя из требований Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых РФ, экологии, санитарной гигиены и долгосрочных планов эксплуатации гидроминеральной базы региона, которая позволяет определить целевые функции систем управления параметрами гидролитосферных процессов;

– методика синтеза распределенных систем управления, позволяющая проектировать системы управления параметрами (пьезометрическим давлением, химическим составом) гидролитосферных процессов.

Следует отметить, что проблема управления гидролитосферными процессами требует перехода на принципиально новую концепцию – *обеспечение технологической и экологической безопасности эксплуатации гидроминеральной базы и региона в целом*.

Разработанные в настоящее время пакеты прикладных программ, технические средства телеметрического сбора, накопления и передачи информации позволяют вести мониторинг и оперативное управление процессами эксплуатации в режиме реального времени и без особого участия человека

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: Математические основы / Пер. с англ. под ред. С. В. Емельянова. М.: Мир, 1978. 312 с.
2. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод: Системный анализ, диагностика, прогноз, управление/ А.В. Малков, И.М. Першин, И.С. Помеляйко и др. М.: Наука, 2015. 283 с.
3. Помеляйко И.С. Результаты комплексного экологического мониторинга региона Кавказских Минеральных Вод» // Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых». Вып. 19. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: РУДН, 2017. С. 333-339.
4. 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.
5. Помеляйко И.С., Коваленко Н.Н. Статус курорта федерального значения – привилегия или кара? /Техногенные процессы в гидролитосфере: Сб. статей. 2-го нац. науч. форума «Нарзан-2013». Пятигорск, РИА-КМВ, 2013. С. 187-214.

6. Першин И.М., Помеляйко И.С. Системный анализ экологического состояния зоны гипергенеза курорта Кисловодск// Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 3. С. 74-81.
7. Помеляйко И.С., Малков А.В. Результаты экологической экспертизы городов-курортов конурбации Кавказских Минеральных Вод// Разведка и охрана недр. М.: ФГБУ «ВИМС», 2017. № 2. С. 55-62.
8. Першин И.М., Малков А.В., Цаплева В.В. Технологическая безопасность эксплуатации гидроминеральных источников. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2012. № 4 (129). С. 25-31.
9. Першин И.М., Малков А.В., Першин М.И. Оптимизация количества водозаборных скважин при эксплуатации месторождений минеральных вод. Недропользование XXI век Межотраслевой научно-технический журнал № 1 (51) февраль 2015. С.100-104.
10. Першин И.М., Малков А.В., Першин М.И. Оперативное и стратегическое управление режимами эксплуатации гидролитосферных объектов. Недропользование XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал № 6а (44) январь 2014. С.40-47
11. Малков А.В, Першин И.М. Обоснование экологически безопасных режимов эксплуатации минеральных вод района КМВ. Недропользование XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал. №5 (42) октябрь 2013. С. 46-53
12. Першин И.М., Уткин В.А. Обеспечение технологической и экологической безопасности гидроминеральной базы региона в свете задач оптимизации и развития гидролитосферы курортов кавказских минеральных вод. Курортная медицина. Научно-практический журнал. №3 2015. С. 7-13
13. Першин И.М., Малков А.В., Дубогрей В.Ф. Методика синтеза распределенных систем управления режимами эксплуатации месторождений минеральных вод. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2012. № 2. С. 76-81.
14. Першин И.М., Малков А.В., Криштал В.А. Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды в регионе КМВ. Современная наука и инновации. 2013. № 1. С. 17-23.
15. Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Pershin I.M. Analysis of the Caucasus Mineral Waters' Field's Modeling. Modern Applied Science. 2015. T. 9. C. 204.
16. Малков А.В., Першин И.М. Проектирование распределенной системы управления режимами эксплуатации месторождения «КЮЛУС». Мехатроника, автоматизация, управление, №4, 2008. С27-31.
17. Веселов Г.Е., Першин М.И. Проектирование распределенных систем управления гидролитосферными процессами. Известия вузов. Геология и разведка. - № 1, 2016 . С.99- 105.
18. Малков А.В., Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидролитосферными процессами.- М: Научный мир, 2007.- 258 с.
19. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. -М.: Научный мир, 2012.- 476с.
20. Першин М.И. Особенности распределенных объектов. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Университетская наука - региону» (3-21 апреля). Пятигорск: Изд-во ПФ СКФУ, 2017. – Т1.С.138-143.
21. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С. Методика подсчета запасов и баланса подземных вод гидравлическим методом. Недропользование XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал № 4 2016. С. 76-85.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПИЩЕВОЙ МАССЫ С РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ФОРМУЮЩЕЙ МАШИНЫ

Аннотация. Исследована возможность управления процессом контактного взаимодействия пищевой массы с рабочей поверхностью формующей машины на примере процесса отливки конфетных масс в формы из различных конструкционных материалов. Разработана математическая модель охладителя как объекта управления. Выполнен синтез распределённой системы управления охладителем.

Ключевые слова: адгезия, структурообразование, теплофизические характеристики, охладитель, математическая модель, распределённая система управления.

Annotation. The possibility of controlling the process of contact interaction between the food mass and the working surface of a forming machine is studied using the example of the process of casting candy masses into molds from various structural materials. A mathematical model of the cooler as a control object was developed. Synthesis of the distributed control system of the cooler is performed.

Keywords: adhesion, structure formation, thermophysical characteristics, cooler, mathematical model, distributed control system.

Введение. Основу производства продуктов питания составляют многостадийные технологические процессы, одним из завершающих этапов которых является формование готовых изделий. Это один из самых сложных и энергоёмких процессов пищевой технологии, в значительной мере обуславливающий потребительские качества готовой продукции.

Особенностью ряда процессов формования является то, что пищевая масса подаётся в формующую машину в вязком или вязко-пластичном состоянии (например, в разогретом). При этом имеет место налипание массы на поверхность рабочих органов машин, что может быть охарактеризовано высоким адгезионным напряжением. На следующем этапе отформованную массу подвергают выстойке при различных температурах, что обеспечивает в ней структурообразование за счёт кристаллизации сахара или жира. Это сопровождается повышением прочности готового изделия и снижением адгезионного напряжения. На завершающем этапе отформованное изделие должно легко отделяться от рабочей поверхности машин, без налипания массы на рабочую поверхность и без дефектов на поверхности готовых изделий [2, 6, 7].

В этой связи актуальной задачей следует считать исследование динамики контактного взаимодействия пищевых материалов с рабочими органами машин и поиск рационального сочетания технологических параметров, обеспечивающих качественные показатели готовых изделий. В качестве объекта исследования был выбран процесс отливки конфетных масс в формы из различных конструкционных материалов с разработкой системы управления процессом охлаждения изделий в формах.

Цель и задачи исследования.

Цель представленной работы – изучить возможность управления процессом контактного взаимодействия пищевых материалов с рабочими органами формующих машин. Для достижения поставленной цели сформулированы задачи исследования:

- изучить динамику адгезионного взаимодействия конфетных масс с конструкционными материалами в процессе структурообразования;
- изучить кинетику структурообразования в зависимости от технологических параметров процессов отливки и охлаждения;
- изучить теплофизические характеристики конфетных масс;
- разработать математическую и дискретную модель процесса охлаждения отлитых корпусов конфет в формах;

- выполнить анализ динамических характеристик объекта управления (охладителя корпусов конфет в формах);
- выполнить синтез распределённой системы управления для рассматриваемого объекта с анализом работы замкнутой системы управления.

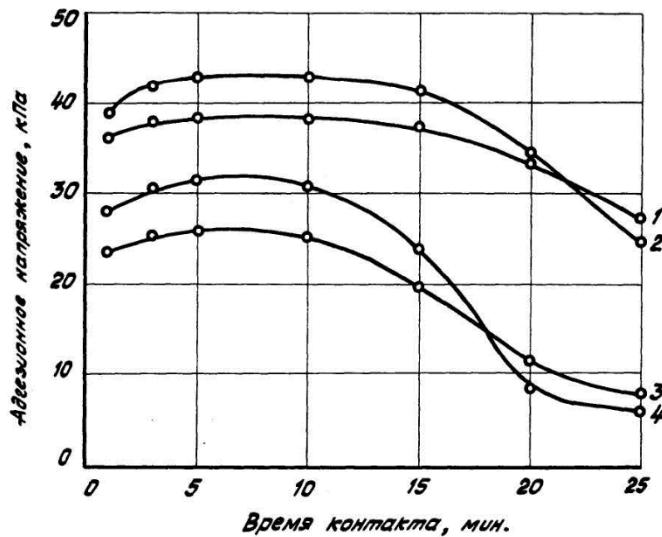
Результаты экспериментального исследования.

Основной задачей экспериментального исследования являлся поиск закономерностей изменения адгезионных, прочностных и теплофизических характеристик при изменении реологического состояния конфетных масс в процессе структурообразования. К основным технологическим факторам, возможность варьирования которых существует в реальном процессе формования отливкой, можно отнести температуру отливаемой массы, температуру формы и продолжительность контакта конфетной массы с формой. Интерес представляет также изучение возможности использования поверхностно-активных веществ (ПАВ) для снижения адгезии конфетных масс к поверхности форм. Результаты экспериментов представлены на рисунках 1 и 2.

В результате статистической обработки данных предложено уравнение регрессии:

$$\sigma_{ad} = a_0 + a_1 T_1 + a_2 T_2 + a_3 c + a_4 \tau + a_5 T_1 T_2 + \\ + a_6 T_2 c + a_7 T_2 \tau + a_8 c \tau + a_9 T_2^2 + a_{10} c^2 + a_{11} \tau^2 \quad (1)$$

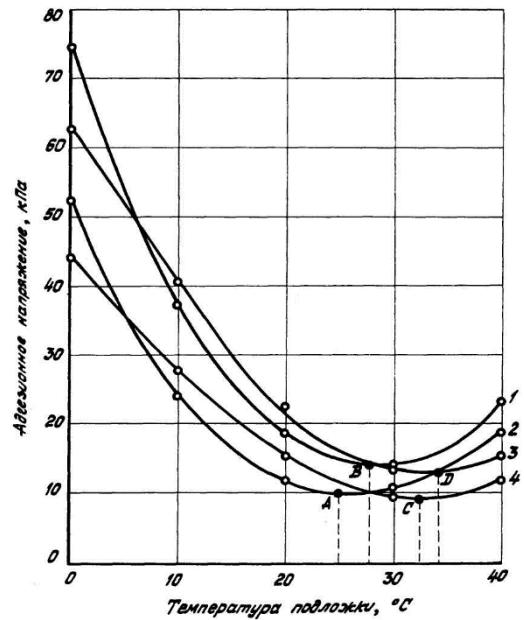
где: σ_{ad} – адгезионное напряжение, кПа; T_1 – температура конфетной массы при отливке, °C; T_2 – температура подложки, °C; c – концентрация ПАВ, %; τ – продолжительность контакта, мин.



1, 3 – молочная масса; 2, 4 – сахарная масса; 1, 2 – температура подложки 10°C; 3, 4 – температура подложки 20°C. Температура конфетной массы при формировании адгезионной связи 70 °C

Рисунок 1 – Зависимость адгезионного напряжения конфетных масс от продолжительности контакта и температуры подложки

Значения коэффициентов регрессионного уравнения (1) приведены в таблице 1. Поверхность отклика, построенная с использованием полученного уравнения для сахарной массы при температуре отливаемой массы 75°C, показана на рисунке 3.

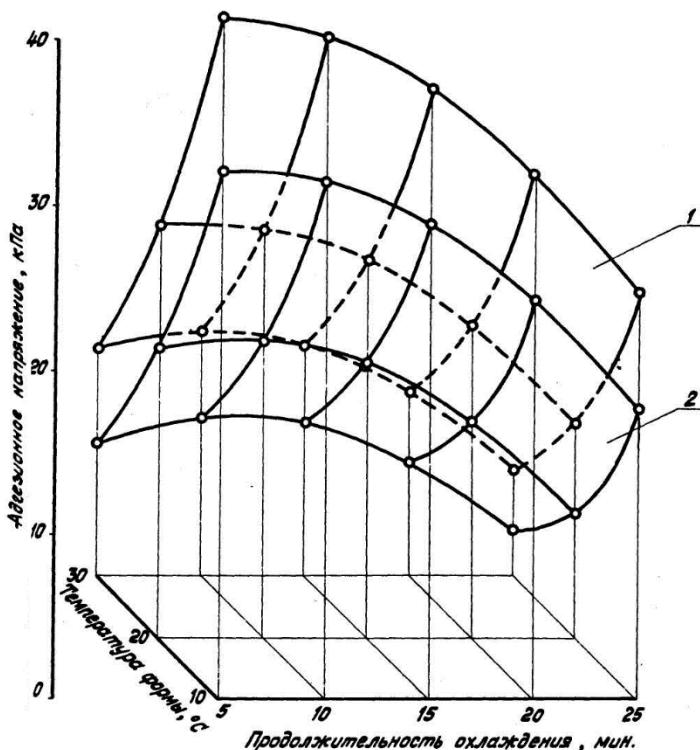


1, 2 – молочная масса; 3, 4 – сахарная масса; I, 3 – без ПАВ; 2, 4 – с добавлением 0,4 % СФК. Температура конфетной массы при формировании адгезионной связи 70°C, время контакта 15 минут

Рисунок 2 – Зависимость адгезионного напряжения конфетных масс от температуры подложки и содержания ПАВ

Таблица 1 – Значения коэффициентов уравнения (1), определяющего зависимость адгезионного напряжения конфетных масс от различных технологических факторов

№ п/п	Коэффициент	Сорт конфетной массы			
		Сахарная	Фруктовая	Молочная	Крем-брюле
1	a_0	14,353	25,995	23,190	16,321
2	a_1	0,654	0,767	0,817	0,796
3	a_2	-1,184	-2,392	-2,603	-2,179
4	a_3	-35,479	-38,961	-38,062	-37,354
5	a_4	0,110	-0,030	0,609	0,418
6	a_5	-0,018	-0,022	-0,024	-0,023
7	a_6	0,422	0,506	0,472	0,467
8	a_7	0,023	0,028	0,025	0,034
9	a_8	0,256	0,338	0,369	0,312
10	a_9	0,026	0,056	0,065	0,053
11	a_{10}	17,608	17,050	14,673	16,275
12	a_{11}	-0,089	-0,041	-0,062	-0,048



1 – без ПАВ; 2 – с добавлением 0,4 % СФК

Рисунок 3 – Зависимость адгезионного напряжения сахарной конфетной массы от продолжительности охлаждения и температуры формы

Приведённые зависимости характеризуют адгезионное взаимодействие конфетных масс с подложкой из стали 45, шероховатость поверхности которой соответствует $Ra 2,5$. Если адгезионное напряжение к стали 45 принять за единицу, то адгезионное напряжение к другим конструкционным материалам можно представить через коэффициенты пересчёта, приведённые в таблице 2.

Таблица 2 – Адгезионное напряжение сахарной конфетной массы к различным конструкционным материалам

№ п/п	Конструкционный материал	$\sigma_{ад}$	K_σ	$\tau_{ад}$	K_τ	$K = \sigma_{ад} / \tau_{ад}$
1	Сталь 45, Ra 2,5	41,35	1,0	59,25	1,0	0,698
2	Фторопласт-4	16,21	0,392	19,61	0,331	0,827
3	Оргстекло	28,61	0,692	37,21	0,628	0,769

Пищевые резины с гладкой поверхностью						
4	ИРП-1338	17,28	0,418	31,34	0,529	0,551
5	ИРП-1344	17,95	0,434	30,39	0,513	0,590
6	52-439	19,68	0,476	32,59	0,550	0,604
7	52-444	25,35	0,613	47,52	0,802	0,533
8	52-446	27,13	0,656	51,78	0,874	0,524
9	52-518	28,74	0,695	50,30	0,849	0,571
Пищевые резины с рифлёной поверхностью						
ИРП-1338 с рифлением:						
10	лавсаном	9,76	0,236	103,10	1,748	0,094
11	капроном	11,54	0,279	94,56	1,596	0,122
12	перкалем	10,05	0,243	80,70	1,362	0,125
52-439с рифлением:						
13	лавсаном	11,78	0,285	114,53	1,933	0,103
14	капроном	13,48	0,326	106,77	1,802	0,126
15	перкалем	12,74	0,308	95,69	1,615	0,133
Пластмассы:						
16	ПЭНД	29,56	0,715	40,46	0,683	0,731
17	ПЭВД	28,16	0,681	36,86	0,622	0,764
18	ПЭС	24,73	0,598	33,06	0,558	0,743
19	ПП	20,34	0,492	29,82	0,503	0,682
20	ПВХ	27,42	0,663	37,61	0,635	0,729

По значениям нормального адгезионного напряжения σ_{ad} исследуемого образца и стали 45 вычислен коэффициент пересчёта K_σ , а по значениям тангенциального напряжения τ_{ad} исследуемого образца и стали 45 – соответственно коэффициент K_τ . Введен коэффициент $K = \sigma_{ad} / \tau_{ad}$, характеризующий фрикционные свойства конструкционного материала [13].

Качественное извлечение готовых корпусов конфет из форм возможно только при достижении ими достаточной прочности, что может быть количественно оценено по предельному напряжению сдвига [5, 8, 17].

В результате статистической обработки экспериментальных данных предложено уравнение регрессии:

$$\Theta_0 = b_0 + b_1 T_1 + b_2 T_0 + b_3 v + b_4 c + \\ + b_5 \tau + b_6 T_0 \tau + b_7 T_0^2 + b_8 \tau^2 \quad (2)$$

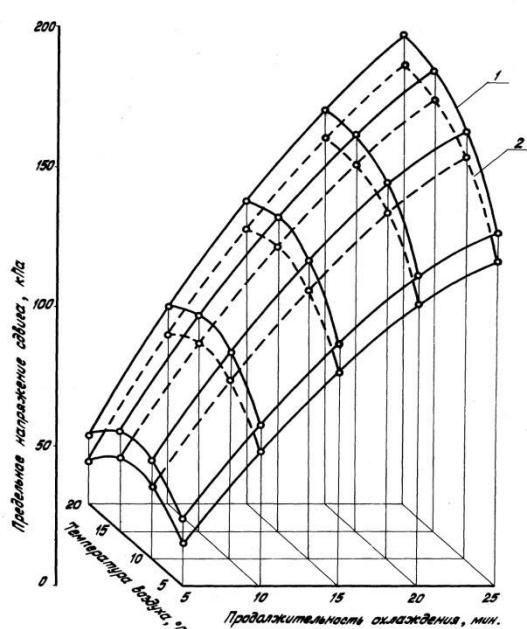
где: Θ_0 – предельное напряжение сдвига, кПа; T_1 – температура конфетной массы при отливке, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – температура охлаждающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; v – скорость движения воздуха, м/с; τ – продолжительность контакта, мин.

Таблица 3 – Значения коэффициентов уравнения (2), определяющего зависимость предельного напряжения сдвига конфетных масс от различных технологических факторов

№ п/п	Коэффициент	Сорт конфетной массы			
		Сахарная	Фруктовая	Молочная	Крем-брюле
1	b_0	-27,261	-23,670	-25,476	-18,479
2	b_1	-0,237	-0,184	0,217	-0,252
3	b_2	2,610	2,343	1,843	1,531
4	b_3	9,524	7,414	6,622	4,124
5	b_4	-25,458	-23,206	-19,120	-14,804
6	b_5	7,956	8,106	7,808	6,589
7	b_6	0,140	0,117	0,111	0,087
8	b_7	-0,108	-0,095	-0,081	-0,063

9	b_8	0,119	-0,116	0,113	-0,090
---	-------	-------	--------	-------	--------

Из анализа коэффициентов уравнения (2) видно, что росту предельного напряжения сдвига способствует уменьшение температуры конфетной массы при отливке и концентрации ПАВ, а также увеличение температуры и скорости охлаждающего воздуха. Продолжительность охлаждения играет существенную роль только на начальном этапе. На рисунке 4 показана поверхность отклика, построенная по уравнению (2).



1 – скорость охлаждающего воздуха 3 м/с; 2 – скорость воздуха 1 м/с;

Рисунок 4 – Зависимость предельного напряжения сдвига сахарной конфетной массы от продолжительности охлаждения и температуры охлаждающего воздуха

Для расчёта нестационарных полей температур в процессе охлаждения конфетных масс в ячейках форм необходимо определить их теплофизические характеристики, т.к. литературные данные по этим характеристикам недостаточны [1, 3, 11, 12]. В работе определены значения коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности a , а также удельная объёмная теплоёмкость $c\rho$ в диапазоне температур $20 \div 80$ °С. Полученные экспериментальные зависимости ТФХ от температуры для различных конфетных масс приведены на рисунках 5 – 7.

Обработка экспериментальных данных позволила предложить следующие обобщённые эмпирические зависимости:

$$\lambda = 0,7526 \cdot \exp(-0,0152t), \quad (3)$$

$$a = \frac{t \cdot 10^{-6}}{(15,730 + 1,390t + 0,0284t^2)}, \quad (4)$$

$$c\rho = 5862,5 \cdot t^{-0,434} \cdot 10^3, \quad (5)$$

где: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; $c\rho$ – удельная объёмная теплоёмкость, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$); t – температура конфетной массы, °С.

На этом основании сделан вывод о том, что интенсивное охлаждение конфетной массы, отлитой в формы, целесообразно проводить в первые минуты выстойки, а по мере продвижения форм в охлаждающей камере температура воздуха должна повышаться. Техническая реализация такого режима возможна при разделении камеры охладителя на секции, в каждой из которых поддерживается заданная температура.

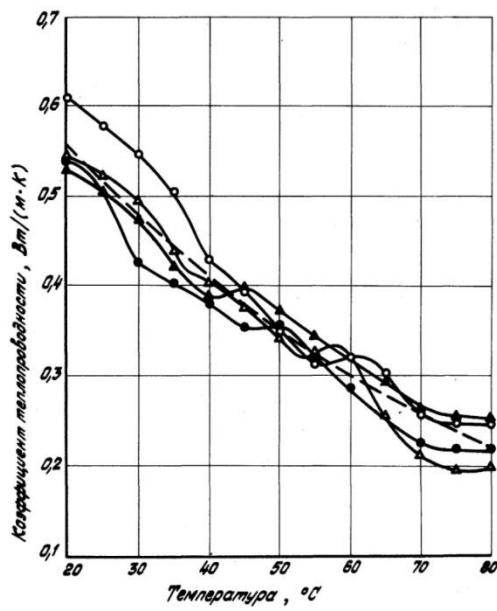


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплопроводности конфетных масс от температуры

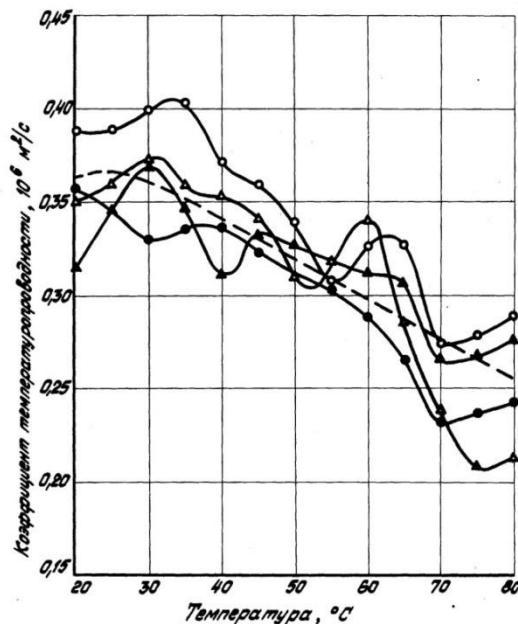


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента температуропроводности конфетных масс от температуры



Рисунок 7 – Зависимость удельной объёмной теплоёмкости конфетных масс от температуры

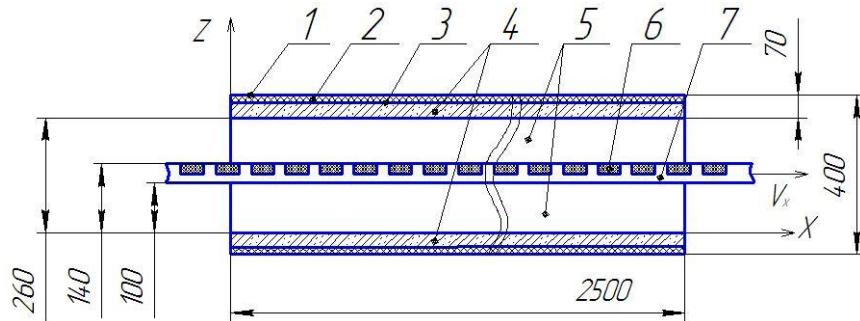
Обозначения	Конфетная масса
—○—	Сахарная
—▲—	Фруктовая
—●—	Крем-брюле
—▲—	Молочная
- - -	

Нелинейный характер зависимостей ТФХ от температуры придаёт кривым S-образный вид, характерный для автокатализитических процессов. Сравнив характер изменений ТФХ при понижении температуры конфетных масс с ростом ПНС в ходе структурообразования, можно сделать вывод о взаимосвязи их теплофизических и структурно-механических характеристик. Таким образом, динамика контактного взаимодействия конфетных масс с конструкционными материалами, из которых изготовлены формы, в значительной мере определяется параметрами процесса охлаждения.

Математическая модель объекта управления.

В качестве объекта управления выбран охладитель конфетных корпусов в формах, схема секции которого показана на рисунке 9.

Рассмотрим камеру охладителя в виде трёхслойного параллелепипеда: верхний слой – воздух, средний слой – конфетная масса в формах, нижний слой – воздух.



1 – облицовка; 2 – теплоизоляция; 3 – корпус; 4 – каналы для охлаждающей жидкости;
5 – каналы для охлаждающего воздуха; 6 – формы с отлитой в них конфетной массой;
7 – транспортёр

Рисунок 9 – Схема секции охладителя

Боковые поверхности камеры S_3, S_5 теплоизолированы (граничное условие 2 рода). Торцевые поверхности S_2, S_4 (вход и выход транспортёра) поддерживаются при постоянной избыточной температуре, равной нулю (граничное условие 1 рода). При использовании частотных методов для описания входного воздействия можно использовать собственные вектор-функции оператора объекта, вид которых определяется граничными условиями.

Так как объект является многослойным, запишем уравнения теплопроводности в дифференциальной форме для каждого слоя [9, 10, 14].

Нижний слой (охлаждающий воздух):

$$\frac{\partial T_1(x, y, z_{1k}, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1(x, y, z_{1k}, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, z_{1k}, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, z_{1k}, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

$$0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad 0 < z_{1k} < z_1,$$

Граничные условия могут быть записаны в виде:

S_2	S_3	S_4	S_5
$T_1(0, y, z_{1k}, \tau) = 0$ $x = 0;$ $0 \leq y \leq L_y;$ $0 \leq z_{1k} \leq z_1;$ $\tau \geq 0$	$\frac{\partial T_1(x, 0, z_{1k}, \tau)}{\partial y} = 0$ $0 \leq x \leq L_x;$ $y = 0;$ $0 \leq z_{1k} \leq z_1;$ $\tau \geq 0$	$T_1(L_x, y, z_{1k}, \tau) = 0$ $x = L_x;$ $0 \leq y \leq L_y;$ $0 \leq z_{1k} \leq z_1;$ $\tau \geq 0$	$\frac{\partial T_1(x, 0, z_{1k}, \tau)}{\partial y} = 0$ $0 \leq x \leq L_x;$ $y = L_y;$ $0 \leq z_{1k} \leq z_1;$ $\tau \geq 0$

Управляющим воздействием служит температурное поле, распределенное по поверхности S_6 :

$$\begin{aligned}
U_1(x, y, 0, \tau) &= T_1(x, y, 0, \tau); \\
0 &\leq x \leq L_x; \\
0 &\leq y \leq L_y; \\
z &= 0; \\
\tau &\geq 0
\end{aligned} \quad (7)$$

где: $U_I(x, y, \theta, \tau)$ – управляющее воздействие.

Функцией выхода является температурное поле $T_I(x, y, z_1^*, \tau)$.

На границе соприкосновения нижнего и среднего слоев выполняются условия равенства температур и тепловых потоков:

$$T_1(x, y, z_1, \tau) = T_2(x, y, z_1, \tau); \quad (8)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, y, z_1, \tau)}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, y, z_1, \tau)}{\partial z}; \quad (9)$$

$$0 \leq x \leq L_x;$$

$$0 \leq y \leq L_y;$$

$$z = z_1;$$

$$\tau \geq 0$$

Средний слой (конфетная масса, отлитая в формы):

Чтобы учесть влияние перемещения транспортёра с формами, введём в уравнение (17) скорость движения транспортёра V_x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_2(x, y, z_{2k}, \tau)}{\partial \tau} &= \\ &= a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2(x, y, z_{2k}, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2(x, y, z_{2k}, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2(x, y, z_{2k}, \tau)}{\partial z^2} \right) - V_x \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$0 < x < L_x, \quad 0 < y < L_y, \quad z_1 < z_{2k} < z_2,$$

Границные условия записаны аналогично приведённым выше.

Рассматриваемый объект управления будем считать принадлежащим к классу пространственно-инвариантных.

В качестве собственных вектор-функций (пространственных мод) выберем функции вида

$$\begin{aligned} U_{\eta, \gamma}(x, y, \tau) &= C_{\eta, \gamma}(\tau) \cdot \sin(\psi_{\eta} \cdot x) \cdot \cos(\tilde{\varphi}_{\gamma} \cdot y), \\ \psi_{\eta} &= \pi \cdot \eta / L_x; \tilde{\varphi}_{\gamma} = \pi \cdot \gamma / L_y, (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}) \end{aligned} \quad . \quad (11)$$

где: η, γ – номера пространственных мод соответственно по x и y .

Вид собственных вектор функций оператора объекта обусловлен выше приведёнными граничными условиями.

Определим реакцию объекта на выбранные моды входного воздействия

$$U(x, y, \tau) = U_{\eta, \gamma}(x, y, \tau), \eta = \eta^*, \gamma = \gamma^*. \quad (12)$$

Реакция объекта на выбранную пространственную моду входного воздействия может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} T(x, y, Z^*, \tau) &= T_{\eta, \gamma}(x, y, Z^*, \tau) = \\ &= H_{\eta, \gamma}(\tau) \cdot \sin(\psi_{\eta} \cdot x) \cdot \cos(\tilde{\varphi}_{\gamma} \cdot y) \end{aligned} \quad . \quad (13)$$

Преобразуя по Лапласу, при нулевых начальных условиях функцию выхода и входное воздействие и взяв их отношение, получим передаточную функцию рассматриваемого объекта по выбранной пространственной моде. В рассматриваемом случае эта передаточная функция может быть записана в виде:

$$W_{\eta, \gamma}(s) = H_{\eta, \gamma}(s) / C_{\eta, \gamma}(s). \quad (14)$$

Записывая передаточную функцию рассматриваемого объекта с использованием обобщенной координаты, получим

$$\begin{aligned}
W(G, s) &= H(G, s) / C(G, s) \\
G &= \psi_\eta^2 + \tilde{\varphi}_\gamma^2, \\
\psi_\eta &= \pi \cdot \eta / L_x; \tilde{\varphi}_\gamma = \pi \cdot \gamma / L_y, (\eta, \gamma = \overline{1, \infty})
\end{aligned} \tag{15}$$

В рассматриваемом случае поставленная задача решалась численно. На основе математической модели объекта была составлена дискретная модель и определена реакция объекта на выбранные пространственные моды входного воздействия, т.е. определена функция $H(G, \tau)$ для выбранных значений η и γ .

Для анализа динамики объекта управления необходимо определить передаточную функцию по двум выбранным пространственным модам. При этом возможны различные варианты аппроксимационных моделей [15, 16].

Если в качестве входного воздействия принята температура поверхности охладителя, то передаточная функция объекта (15) по каждой пространственной моде входного воздействия имеет вид:

$$W_0(G, s) = \frac{(\exp(\beta(G) \cdot z) + \exp(-\beta(G) \cdot z))}{(\exp(\beta(G) \cdot z_L) + \exp(-\beta(G) \cdot z_L)}, \tag{16}$$

$$\beta(G) = \left(\frac{s}{a} + G \right)^{0.5}$$

где: G – обобщённая координата; s – оператор Лапласа; a – заданный параметр (коэффициент температуропроводности).

При переходе к пределу передаточной функции для $\omega \rightarrow \infty$, уравнение (16) позволяет записать аппроксимационную модель рассматриваемого объекта в следующем виде:

$$\begin{aligned}
W_{a,\eta,\gamma}(s) &= \frac{K}{\beta_{\eta,\gamma} + 1} \cdot \exp(-\beta_{\eta,\gamma} \cdot \Delta z), \\
&\quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}), \\
\beta_{\eta,\gamma,\xi} &= \left(\frac{s}{a} + \psi_\eta^2 + \tilde{\varphi}_\gamma^2 \right)^{0.5}
\end{aligned} \tag{17}$$

где: K – коэффициент, определяемый в ходе моделирования через статический коэффициент усиления объекта K_{co} по выбранной пространственной моде.

По результатам расчётов запишем аппроксимационную модель (17) рассматриваемого объекта в следующем виде:

– для нижнего слоя воздуха в камере охлаждения:

$$\begin{aligned}
W_{a,\eta,\gamma}(s) &= \frac{0.243073}{\beta_{\eta,\gamma} + 1} \cdot \exp(1.292060 \beta_{\eta,\gamma}), \\
&\quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}), \\
\beta_{\eta,\gamma,\xi} &= \left(\frac{s}{0.007160} + \psi_\eta^2 + \tilde{\varphi}_\gamma^2 \right)^{0.5}
\end{aligned} \tag{18}$$

– для верхнего слоя воздуха в камере охлаждения:

$$\begin{aligned}
W_{a,\eta,\gamma}(s) &= \frac{0.245080}{\beta_{\eta,\gamma} + 1} \cdot \exp(1.272431 \beta_{\eta,\gamma}), \\
&\quad (\eta, \gamma = \overline{1, \infty}),
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\beta_{\eta,\gamma,\xi} = \left(\frac{s}{0.007107} + \psi_\eta^2 + \tilde{\varphi}_\gamma^2 \right)^{0.5}$$

Далее выполнен синтез распределённой системы управления для рассматриваемого объекта с анализом работы замкнутой системы управления.

Подставляя результаты вычислений параметров в уравнение для передаточной функции распределённого высокоточного регулятора [4, 10]:

$$W(x, y, s) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + \\ + E_2 \cdot \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot s. \quad (20)$$

получим математическую модель синтезированного регулятора:

– для нижнего слоя воздуха в камере охлаждения:

$$W(y, s) = 165.575520 \cdot \left[\frac{1.403683}{2.403683} - \frac{1}{2.403683} \nabla^2 \right] + \\ + 0.009335 \cdot \left[\frac{2.071406}{3.071406} - \frac{1}{3.071406} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + 2.928844 \cdot s. \quad (21)$$

– для верхнего слоя воздуха в камере охлаждения:

$$W(y, s) = 164.872041 \cdot \left[\frac{1.423017}{2.423017} - \frac{1}{2.423017} \nabla^2 \right] + \\ + 0.007506 \cdot \left[\frac{2.092568}{3.092568} - \frac{1}{3.092568} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + 3.633185 \cdot s. \quad (22)$$

Подавая на вход регулятора функцию рассогласования ($\Delta T_j(\tau)$) и записывая результат во временной области, на выходе получим алгоритм управления:

– для нижнего слоя воздуха в камере охлаждения:

$$U(y_j, \tau) = 165.575520 \cdot \left[\frac{1.403683}{2.403683} \Delta T_j(\tau) - \frac{1}{2.403683} \frac{\Delta T_{j-1}(\tau) - 2\Delta T_j(\tau) + \Delta T_{j+1}(\tau)}{\Delta y^2} \right] + \\ + 0.009335 \cdot \int_{\tau} \left[\frac{2.071406}{3.071406} \Delta T_j(\tau) - \frac{1}{3.071406} \frac{\Delta T_{j-1}(\tau) - 2\Delta T_j(\tau) + \Delta T_{j+1}(\tau)}{\Delta y^2} \right] \partial \tau + \\ + 2.928844 \cdot \partial \Delta T_j(\tau) / \partial \tau, \quad (j = 1, 2, 3). \quad (23)$$

– для верхнего слоя воздуха в камере охлаждения:

$$U(y_j, \tau) = 164.872041 \cdot \left[\frac{1.423017}{2.423017} \Delta T_j(\tau) - \frac{1}{2.423017} \frac{\Delta T_{j-1}(\tau) - 2\Delta T_j(\tau) + \Delta T_{j+1}(\tau)}{\Delta y^2} \right] + \\ + 0.007506 \cdot \int_{\tau} \left[\frac{2.092568}{3.092568} \Delta T_j(\tau) - \frac{1}{3.092568} \frac{\Delta T_{j-1}(\tau) - 2\Delta T_j(\tau) + \Delta T_{j+1}(\tau)}{\Delta y^2} \right] \partial \tau + \\ + 3.633185 \cdot \partial \Delta T_j(\tau) / \partial \tau, \quad (j = 1, 2, 3). \quad (24)$$

Результаты расчётов показывают, что замкнутая система будет устойчива, а запасы устойчивости по модулю и фазе – не менее заданных.

Моделируя работу замкнутой системы управления, получены графики переходных процессов. На вход системы было подано входное воздействие 10 град. График переходного процесса в разных точках установки датчиков приведён на рисунке 10. Результаты расчётов показали, что замкнутая система устойчива, а запасы устойчивости по модулю и фазе – не менее заданных. Время регулирования не более 12 минут.

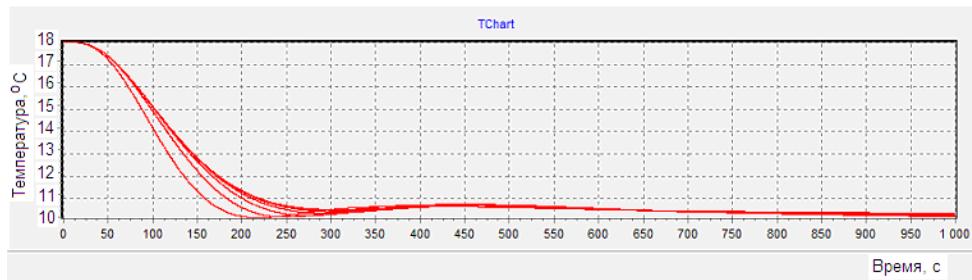


Рисунок 10 – График переходного процесса

Заключение.

В соответствии с целью работы изучена возможность управления процессом контактного взаимодействия пищевых материалов с рабочими органами формующих машин.

В соответствии с поставленными задачами исследования:

- определено в динамике адгезионное напряжение конфетных масс по отношению к различным конструкционным материалам и его изменение в процессе структурообразования;
- изучено влияние технологических факторов на структурообразование в конфетных массах, отлитых в формы из конструкционных материалов;
- определены теплофизические характеристики (ТФХ) конфетных масс, которые использованы в качестве исходных данных при проектировании системы управления, а также выявлена взаимосвязь изменений ТФХ с этапами структурообразования;
- определён разброс структурно-механических и теплофизических параметров конфетных масс как объектов формования, что позволило оценить величину возмущающих воздействий для системы управления процессом;
- обоснованы рациональные режимы процессов отливки и охлаждения конфетных корпусов в формах, которые использованы в качестве исходных данных при проектировании системы управления;
- получена математическая модель процесса охлаждения отлитых в формы корпусов конфет в камере охладителя;
- составлена дискретная модель объекта управления, использованная при численном моделировании;
- выполнен анализ динамики объекта управления;
- для описания динамических характеристик объекта управления найдены аппроксимационные модели, построенные по результатам численного моделирования.

Для решения поставленной задачи синтеза распределённого высокоточного регулятора для управления температурным полем в камере охладителя выбран частотный метод синтеза распределенных регуляторов с векторным входным воздействием. В результате численного моделирования получена математическая модель синтезированного распределённого высокоточного регулятора и выполнен анализ работы замкнутой системы управления. Результаты расчётов показали, что замкнутая система устойчива, а запасы устойчивости по модулю и фазе – не менее заданных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности: В 2-х ч. Ч. 2. – М.: Высшая школа, 1982. – 304 с.
2. Берман Г.К. Формование пищевых масс. Теория процессов, методы расчёта технологического оборудования. – Автореф. дисс...д.т.н. – М., 1983. – 52 с.
3. Булатов Н.К., Лундин А.В. Термодинамика необратимых физико-химических процессов. – М.: Химия, 1984. – 386 с.
4. Григорьев В.В., Быстров С.В. Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПб ГУИТМО, 2011. – 200с.

5. Замыцкий И.А. Математическая модель кинетики структурообразования вязкопластической среды // В сб.: Теоретические и практические аспекты применения методов ИФХМ с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств. – М., 1986. – С. 186-187.
6. Зимон А.Д. Адгезия пищевых масс. – М.: Агропромиздат, 1985. – 272 с.
7. Калинина С.М. Управление поверхностными свойствами высоковязких пищевых масс с целью интенсификации технологических процессов. – Автореф. дис... к.т.н. – М., 1986. – 23 с.
8. Колодёжнов В.Н. Особенности решения задач структурообразования пищевых масс с нелинейными ТФХ // В сб.: Теоретические и практические аспекты применения методов ИФХМ с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств. – М., 1986. – С. 188-189.
9. Кучеренко И.А., Первухин Д.А., Першин И.М., Ляшенко А.Л., Ильюшин Ю.В. Чернышев А.Б. Моделирование температурного поля многослойного объекта управления с распределенными параметрами // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661620. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.12.2013.
10. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.
11. Методы определении теплопроводности и температуропроводности / Под ред. А.В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
12. Папуш Е.Г., Клименчук О.А. Автоматизация теплофизических измерений в лабораторном практикуме с использованием программного обеспечения LABVIEW. // Материалы науч.-метод. конф. ППС ПГТУ «Повышение качества подготовки специалистов на основе новых образовательных технологий»/ Под ред. докт. ист. наук, акад. В.А. Казначеева. – Пятигорск: Изд-во «Технологический университет», 2005. – С. 219-220.
13. Папуш Е.Г. Адгезионные свойства конфетных помадных масс в процессе структурообразования. // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. Вузовская наука – Северо-Кавказскому федеральному округу. Том третий. Технические науки. Секция с международным участием «Инновационные направления в пищевых технологиях». 9-10 апреля 2013 года. – Пятигорск, 2013. – С. 328-333.
14. Першин И.М., Кухарова Т.В. [Описание многомерных объектов дифференциальным уравнением в частных производных](#) // [Системный синтез и прикладная синергетика](#). Сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. – Таганрог, 2015. – С. 150-158.
15. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // [Системный синтез и прикладная синергетика](#). Сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. – Таганрог, 2015. – С. 106-117.
16. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // [Известия Южного федерального университета. Технические науки](#). – Таганрог: 2015. – № 7 (168). – С. 126-138.
17. Фольмер М. Кинетика образования новой фазы / Под ред. К.М. Горбуновой и А.А. Чернова. – М.: Наука, 1986. – 208 с.

*Пищеничина Валерия Александровна (1), Щитов Дмитрий Викторович (2),
Сидякин Павел Алексеевич (2)*

1. Волгоградский государственный технический университет
2. Северо-Кавказский федеральный университет

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗДАНИЙ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКИ КУРОРТНОГО РЕГИОНА КАВКАЗСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ

Аннотация. Целью работы является анализ строительно-технического состояния зданий исторической застройки курортного региона Кавказские Минеральные Воды. Данные здания являются лицом городов-курортов КМВ, поэтому вопросам их сохранения необходимо уделять повышенное внимание. В данной работе представлены задачи, решение которых направлено на обеспечение долговечности зданий исторической застройки курортного региона Кавказские Минеральные Воды. Реализация данных задач способствует сохранению уникального облика курортного региона.

Ключевые слова: Кавказские Минеральные Воды, историческая застройка, здания, долговечность, надежность, безопасность.

Annotation. The purpose of the work is to analyze the construction and technical condition of the historical buildings of the resort region of the Caucasus Mineral Waters. These buildings are the face of the resort towns of the CMW so the issues of their preservation should be given increased attention. In this paper, the tasks are presented, the solution of which is aimed at ensuring the durability of the historical buildings of the Caucasus Mineral Waters resort region. The implementation of these tasks contributes to the preservation of the unique appearance of the resort region.

Keywords: resort Caucasian Mineral Waters, historical buildings, buildings, durability, reliability, security.

Введение. Регион Кавказские Минеральные Воды обладает целым рядом существенных достоинств, которые являются уникальными и требующими постоянного внимания и сохранения.

В настоящее время нами проводится комплекс строительно-технических и экологических исследований объектов строительного комплекса, территории и городского хозяйства курортного региона Кавказские Минеральные Воды [1-5]. Основными задачами данных исследований являются выявление проблем строительно-технического и экологического характера и при необходимости разработка конкретных мероприятий и рекомендаций, направленных для их решения. В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением долговечности зданий исторической застройки курортного региона Кавказские Минеральные Воды, при этом необходимо отметить два существенных момента, отраженных в работе [1]:

- в связи с рядом причин число зданий исторической застройки постоянно уменьшается;
- техническое состояние значительного числа зданий, исторической застройки, для которых не проводятся мероприятия, направленные на их сохранение и реконструкцию ежегодно ухудшается.

На территории городов Кавказских Минеральных Вод отдельного внимания заслуживают объекты особо ценного исторического наследия, относящиеся к начальному периоду становления курортных городов с 1800 до 1920 годы. Богатое прошлое зданий городов: Кисловодска, Пятигорска, Ессентуков, Георгиевска и Железноводска связано с историческими событиями и легендарными личностями. Классики искусства, поэты и писатели, музыканты и художники, творческие люди и выдающихся граждан России Лермонтов М.Ю., Толстой Л.Н., Пушкин А.С., Ермолов А.П., Шаляпин Ф.И. и многие другие Жили, творили, созидали и исполняли свой долг на Кавказе. Благодаря им и реальная история России и богатое творческое наследие, отраженное в широко известные произведениях с литературными и художественными образами пронизывают и наполняют эти живописные дома, улицы и парки.

Практически все здания и сооружения этого периода имеют индивидуальные уникальные архитектурные элементы, перекликающиеся со стилистикой застройки сходного периода в г. Санкт-Петербурге. Благодаря привлечению Ермоловым А. П. ведущих европейских мастеров-архитекторов в частности братьев Бернардацци и контракту на проектирование и постройку необходимых зданий на Кавказе, технологии и конструктивные формы лучших европейских зданий смогли реализоваться в архитектурные шедевры на КМВ. Братья Бернардацци начали свой творческий путь в итальянской части Швейцарии, действующие архитекторы продолжили созидание в России с 1820 года, первоначально участвовали в создании зданий в Санкт-Петербурге: Иссакиевский собор и при реконструкции Аничкова дворца. Далее больше 20 лет проектировали и строили в городах-курортах Кавказских Минеральных Вод, Георгиевске и Ставрополе. Проект генерального плана Пятигорска, разработанный Бернардацци, был одобрен в 1827 году Г.А. Емануелем. Благодаря сформировавшемуся родовому архитектурному таланту братьев Бернардацци фасады зданий сохраняли единство стиля с классическими фасадами казенных домов городов-курортов. Мастера работы с травертином (машукский камень – туфовый известняк) обучали солдат и крестьян камнетёсному и камнерезному искусству, которое и сейчас спустя больше 200 лет восхищает и очаровывает внимательных ценителей архитектуры при прогулках по городам Кавказских Минеральных Вод. Фасады, фронтоны, эркеры, карнизы и цоколи зданий дореволюционного периода, созданные итальянскими мастерами и их учениками поразительно напоминают фасады итальянских и испанских домов, выполненных кирпичной кладкой с использованием травертина. Слоны горы Машук хранят многочисленные карьерчики со следами добычи этого изящного природного каменного материала.

Анализ применяемых строительных материалов и технологий. Общие конструктивные типологии исторических зданий Кавказских Минеральных Вод и прилегающих территорий сводятся к нескольким типовым решениям, которые рассмотрены ниже

Фундаменты зданий являются ленточными, выполненными из следующих материалов:

- бутовые (природный камень – бештаунит, плотные осадочные породы, травертин);
- тёсаные блоки природного камня (травертин).

Цоколи зданий:

- кладка природного камня (бештаунит, травертин)
- тёсаные блоки природного камня (травертин, песчаник)

Конструкции стен, включают перемычки оконных и дверных проёмов, а также арки, выполнены:

- из блоков природного камня и замковым камнем;
- наклонной кирпичной кладки с замковым камнем из травертина или песчаника;
- наклонной кирпичной кладки с кирпичным замком.

Фасады и элементы зданий выполнены:

- цельными травертиновыми или песчаниковыми блоками;
- смешанной кладкой из кирпичей и блоков природного камня;
- кирпичной кладкой со всех сторон;
- бутовой кладкой со всех сторон;
- кирпичной кладкой на фасаде, торцы выполнены бутом.

Перекрытия зданий:

- деревянные;
- металлические балки;
- арочные бетонные с металлическими балками.

Балконы зданий выполнены с применением ограждений, выполненных в виде кованых решеток, несущие конструкции консольные или с опиранием на колонны:

- деревянные балки
- металлические балки

При этом в городах-курортах Кисловодск и Ессентуки преобладают лицевые поверхности из камней и блоков песчаника и травертина с незначительным включением вулканических камней

бештаунита. В городе-курорте Железноводске применялись бештаунит и травертин. В городе-курорте Пятигорске, являющемся столицей Северо-Кавказского федерального округа, практически все сохранившиеся здания исторической застройки, выполнены с использованием травертина.

Общее количество особо ценных исторических зданий построенных до 1920 года, сохранившихся до настоящего времени по городам Кавказских Минеральных Вод составляет:

- г. Пятигорск более 500 многоквартирных жилых домов и около 100 общественных зданий;
- г. Ессентуки более 50 многоквартирных жилых домов и около 50 общественных зданий;
- г. Кисловодск более 300 многоквартирных жилых домов и около 100 общественных зданий;
- гг. Железноводск, Георгиевск, Новопавловск более 50 многоквартирных жилых домов и около 30 общественных зданий.

Таким образом, более 1000 зданий исторической застройки, расположенных на территории особо охраняемого курортного региона Кавказские Минеральные Воды нуждаются в постоянном мониторинге их строительно-технического состояния, с целью обеспечения их долговечности, надежности, а также эстетической привлекательности для жителей и гостей курортного региона.

Обеспечение долговечности зданий. Согласно, исследованиям, проведенными нами к настоящему времени, техническое состояние зданий исторической застройки существенно отличается, ряд факторов, оказывающих влияние на их сохранность, рассмотрен в работах [1,6,7]. С целью обеспечения сохранности зданий исторической застройки для настоящего и будущих поколений необходимо разработать и реализовать мероприятия, направленные, прежде всего на повышение их долговечности. При этом необходимо учитывать, что рассматриваемые территории по сейсмическому воздействию относятся к регионам, где их интенсивность достигает 8-9 баллов по 12-балльной макросейсмической шкале MSK-64 [8].

Следовательно, обеспечение долговечности зданий исторической застройки курортного региона Кавказские Минеральные Воды связано с решением следующих задач:

- прогнозирование остаточного ресурса зданий, находящихся в настоящий момент в удовлетворительном техническом состоянии, а также зданий, конструкции которых получили повреждения в результате неравномерных деформаций основания. К таким повреждениям относятся силовые трещины в надоконных перемычках, участках наружных стен, выветривание раствора из швов кладки и другие.

- оценка риска по отношению к экстремальным сейсмическим воздействиям и разработка мероприятий по повышению безопасности зданий на принятом сроке их дальнейшей эксплуатации.

На первом этапе прогнозирования индивидуального ресурса эксплуатируемого здания проводится оценка технического состояния его конструкций и основания, выявление дефектов и повреждений методами неразрушающего контроля. Вторым этапом определяется фактическая нагрузка и фактические условия эксплуатации исследуемых конструкций. На завершающей стадии выполняется сверка фактического ресурса с показателями надежности, заложенными на стадии проектирования, прогнозирование оптимального остаточного срока эксплуатации на основе полученных данных, а также оценка вероятности наступления отказов конструкций при нормальной эксплуатации. На третьем этапе оценивается фактическая сейсмостойкость зданий и вероятность отказа при реализации землетрясения проектной интенсивности.

Для несущих конструкций зданий параметрами, определяющими их работоспособность, являются несущая способность и жесткость, по изменению которых при проведении технической экспертизы можно судить о ходе процесса износа и разрушения. При этом следует учитывать, что на конструкции оказывают влияние множество случайных факторов, трудно поддающихся описанию. Поэтому достоверный прогноз остаточного ресурса здания в целом и его конструкций возможность получить только на основе вероятностных методов теории надежности.

При совместном действии постепенных отказов и отказов, связанных с экстремальными сейсмическими нагрузками, вероятность безотказной работы конструкции $P(t)$ рассматривается как сложное событие, заключающееся в совместном выполнении двух условий: безотказности при износовых повреждениях $P_1(t)$ и безотказности от экстремальных воздействий $P_2(t)$. Вероятность

безотказной работы конструкции при условии независимости этих отказов, равна произведению соответствующих вероятностей:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t). \quad (1)$$

Безотказность $P_2(t)$ определяется степенью сейсмической опасности района строительства как вероятностью превышения расчетного землетрясения в течение времени t хотя бы один раз и вычисляется по закону Пуассона с постоянной интенсивностью:

$$H(t) = 1 - \exp(-\Lambda t), \quad (2)$$

где $\Lambda = 0,02$ лет⁻¹ – частота, соответствующая периоду повторяемости землетрясения 500 лет по карте А ОСР-97.

Необходимый уровень безопасности по отношению к сейсмическим воздействиям обеспечивается выбором экстремального расчетного землетрясения, на основе оценки сейсмического риска [9]. Максимальное расчетное ускорение грунта a^* во время землетрясения в зависимости от срока службы T и заданного предельно допустимого риска H^* находится по следующей формуле:

$$a^* = \left(\omega_0^2 \sigma / \mu \right) \left[2 \ln \left(\omega_0 \tau_E \Lambda T / \pi H^* \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

где ω_0 – собственная частота системы; τ_E – продолжительность интенсивной фазы землетрясения; T – срок службы; μ – параметр демпфирования; σ – стандарт перемещения системы.

Требуемая величина риска H^* , или обеспеченности P^* , должна быть согласована с некоторой допустимой для данного класса зданий оптимальной надежностью. Рассматриваемые здания исторической застройки относятся к системам с неэкономической ответственностью, высокая надежность которых может быть обеспечена чисто конструктивными мероприятиями, не приводящими к высоким затратам. В этом случае критерий максимальной надежности освобождается от ограничения на стоимость [10], и оптимальные значения P^* или H^* определяются без экономических критериев, но исходя из критерия максимальной надежности, двойственного критерию минимальной стоимости.

Существенным преимуществом критерия оптимизации, основанного на надежности, состоит в том, что ограничения типа условий прочности или жесткости заменяются единым ограничением на показатель надежности P^* . В процессе эксплуатации общее сопротивление зданий интенсивным воздействиям снижается вследствие накопления повреждений, износа, пластических остаточных деформаций, неравномерных деформаций основания. Факторы риска для таких зданий связаны с продолжительностью эксплуатации: с одной стороны, экстремальные воздействия являются функциями времени, с другой стороны, выработка ресурса, сопровождаемая износом и накоплением повреждений, снижает сопротивляемость по отношению к сейсмическим воздействиям. В этом случае требования безопасности выступают в качестве ограничений на срок службы T , когда требуемый уровень безопасности нарушается до достижения предельного состояния вследствие накопленных повреждений. Тогда критерий надежности принимается в следующем виде:

$$P(T^*) \geq P^*, \quad (4)$$

где T^* – установленный срок службы; P^* – предельно допустимое значение критерия надежности к истечению указанного срока.

Заключение. Таким образом, выполнение качественной оценки технического состояния зданий исторической застройки позволит подобрать наиболее оптимальные и экономически обоснованные мероприятия для их сохранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шебзухова Т.А., Сидякин П.А., Щитов Д.В., Вартумян А.А. Экологическая безопасность инженерной инфраструктуры городов и рекреационных территорий Северного Кавказа. Пятигорск, 2016. Том Часть 1. - 144 с.
2. Пшеничкина В.А., Экба С.И., Сидякин П.А., Щитов Д.В. Оценка сейсмостойкости жилищного фонда Ставропольского края // Вестник МГСУ. 2017. № 4 (103). - С. 452-456.
3. Сидякин П.А., Щитов Д.В., Палатов Р.Р., Янукян Э.Г. Сейсмобезопасность зданий и сооружений Ставропольского края // В сборнике: Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции. 2016. - С. 216-220.
4. Сидякин П.А., Щитов Д.В., Фоменко Н.А. К вопросу о гигиеничности строительных материалов Ставропольского края по радиационному признаку // Современные научноемкие технологии. 2016. № 3-2. - С. 280-283.
5. Сидякин П.А., Щитов Д.В., Экба С.И. Необходимость комплексного подхода к изучению экологичности и гигиеничности строительных материалов Ставропольского края [Текст] // Перспективы развития строительного комплекса. 2012. Т. 1. С. 48–50.
6. Щитов Д.В., Щитова Т.В. Особенности обследования несущих конструкций реконструируемых зданий и сооружений [Текст] // Современная наука и инновации. 2014. № 4 (8). С. 72-77.
7. Политов С.И., Сидякин П.А., Палатов Р.Р. Особенности безопасного обследования оснований существующих зданий и сооружений [Текст] // Технологии гражданской безопасности. 2015. Т. 12. № 2 (44). С. 64–69.
8. СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81* (актуализированного СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011)) (с Изменением N 1).
9. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
10. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. - 350 с.

Рапопорт Эдгар Яковлевич, Плешиццева Юлия Эдгаровна

Самарский государственный технический университет

ВЕКТОРНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Аннотация. Предлагаются конструктивные способы решения широкого круга параметризуемых задач оптимального управления системами с распределенными параметрами в условиях векторной формы предъявляемых требований к выбору критерии оптимальности, учитываемых ограничений и управляющих воздействий применительно к оценкам в равномерной метрике точности приближения конечного состояния объекта к требуемому. На рассматриваемые задачи распространяется разработанный ранее альтернативный метод решения их скалярных модификаций.

Ключевые слова: системы с распределенными параметрами, альтернативный метод, многокритериальная оптимизация, многоканальное управление, комбинированные ограничения.

Annotation. The constructive techniques for solving the wide class of optimal control problems for distributed parameters systems are suggested. The problems of vector optimization are solved, i.e. the requirements to the choice of optimization criteria, constraints taken into account and control actions are prescribed in the vector form. The accuracy of a final state approaching to the required state is estimated in a uniform metric. Predeveloped alternance method for solving optimal control problems in scalar form is extended to considered class of vector optimization problems.

Keywords: distributed parameter systems, alternative method, multicriteria optimization, multichannel control, combined constraints.

Введение. В целом ряде актуальных для приложений ситуаций возникают трактуемые с позиций системного подхода новые, существенно отличающиеся от традиционных постановки задач оптимального управления системами с распределенными параметрами (СРП) в усложненных условиях векторной формы предъявляемых требований к критериям эффективности, учитываемым ограничениям и выбору управляющих воздействий (ВЗОУ).

Трудности отыскания алгоритмов оптимизации в ВЗОУ значительно возрастают по сравнению с их известными скалярными частными случаями.

В настоящей работе предлагаются конструктивные методы решения подобных ВЗОУ СРП применительно к типичным для приложений оценкам в равномерной метрике точности приближения конечных состояний СРП к требуемым.

Развиваемый подход базируется на процедуре предварительной параметризации искомых управляющих воздействий с помощью известных условий оптимальности и последующей редукции исходной задачи к специальным модификациям задачи математического программирования с бесконечным числом ограничений (задача полубесконечной оптимизации (ЗПО)), разрешаемым альтернативным методом [1-3].

1. Многокритериальная оптимизация СРП.

Оценка эффективности функционирования сложных управляемых систем как правило производится в приложениях по целому ряду различных показателей качества, чаще всего конфликтующих друг с другом, что приводит к представляющей большой самостоятельный интерес многокритериальной задаче (МЗУ) выбора возможных альтернатив для управляющих воздействий в подобных условиях неопределенности целей процесса управления [4,5]. Отбор приемлемых вариантов производится при этом среди эффективных решений (множество Парето), не улучшаемых ни по одному из критерииев без ухудшения показателей по какому-либо из остальных.

Традиционные способы редукции исходной МЗУ к однокритериальной свертке компонентов векторной целевой функции с заданными весовыми коэффициентами приводят к построению множества Парето путем перебора всех допустимых значений таких коэффициентов, вследствие

чего возникает самостоятельная проблема оптимального выбора в пределах этого множества единственной альтернативы в условиях значительного числа возможных вариантов [4,5].

Переход путем соответствующей процедуры нормирования к относительным оценкам всех составляющих векторного критерия с последующим использованием их минимаксной (или максиминной) свертки с единичными весовыми коэффициентами позволяет непосредственно получить Парето-эффективное решение многокритериальной задачи, которая в итоге сводится после параметризации искомых управляющих воздействий к специальной задаче математического программирования (ЗМП) с учетом всех изначально заданных ограничений [5].

Применительно к СРП формулируемая в итоге ЗМП принципиально усложняется и принимает вид ЗПО с бесконечным числом ограничений в типичных условиях их оценки в равномерной метрике [1-3].

Для СРП с управляемой функцией состояния $Q(X, t)$, описываемой в пределах односвязной m -мерной пространственной области $V \ni X, 1 \leq m \leq 3$, с кусочно-гладкой границей S линейным неоднородным уравнением в частных производных параболического типа с типовыми краевыми условиями и внутренними $u_V(t)$ или граничными $u_S(t)$ сосредоточенными управляющими воздействиями, МЗУ формулируется в следующем виде [6]:

$$\begin{aligned} I_{\Sigma} &\rightarrow \min_{u \in \Omega_{\Sigma}} ; I_{\Sigma} = (I_p(u)), p = \overline{1, q}; u \in \{u_V(t), u_S(t)\}; \\ \Omega_{\Sigma} &= \{u : \Phi_{\Sigma}(u) \leq \varepsilon_0; u \in [u_{\min}, u_{\max}]\}; \\ \Phi_{\Sigma}(u) &= \max_{X \in V} |Q(X, t^*) - Q_C|. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $I_p(u)$ - частные критерии оптимальности, заданные в типовой форме интегральных функционалов качества [6], общее количество которых равно $q > 1$, и ε_0 - заданная точность равномерного приближения состояния $Q(X, t^*)$ СРП в конечный момент времени $t = t^*$ к требуемому $Q_C = const$.

Переход от I_p к относительным равнозначным оценкам [5]

$$\lambda_p(u) = \frac{I_p(u) - I_p^*}{I_p^0 - I_p^*}; 0 \leq \lambda_p(u) \leq 1, p = \overline{1, q} \quad (2)$$

где I_p^* и I_p^0 - минимальная и «наихудшая» величины I_p соответственно в условиях заданных ограничений, приводит к минимаксной свертке МЗУ (1) [5,6].

$$\lambda(u) = \max_{p \in \{1, q\}} \lambda_p(u) \rightarrow \min_{u \in \Omega_{\Sigma}}, \quad u^{**} = \arg \min_{u \in \Omega_{\Sigma}} \left[\max_{p \in \{1, q\}} \lambda_p(u) \right], \quad (3)$$

точка оптимума которой u^{**} заведомо принадлежит множеству Парето исходной МЗУ и может рассматриваться в качестве искомого решения задачи (1) [5,6].

Минимаксная задача (3) эквивалентна обычной однокритериальной задаче

$$I = \frac{1}{t^*} \int_0^{t^*} \lambda^0 dt = \lambda^0 \rightarrow \min_{u \in \Omega_{\Sigma}} ; \quad \frac{d\lambda^0}{dt} = 0; \quad \lambda_p(u) \leq \lambda^0, p = \overline{1, q}; \quad (4)$$

с интегральным функционалом качества, дополнительными ограничениями на величину $\lambda_p(u)$ и минимизируемым параметром $\lambda^0 = const$.

Ввод дополнительных переменных $z_p(u)$, $p = \overline{1, q}$, согласно уравнениям

$$\frac{dz_p}{dt} = f_{0p}; z_p(t^*) = I_p(u), p = \overline{1, q}, \quad (5)$$

где f_{0p} - подынтегральные функции критериев $I_p(u)$, приводит к эквивалентной (3) задаче оптимального управления (2), (4), (5).

Распространяемая на такую задачу стандартная процедура принципа максимума Понtryгина, как правило, позволяет найти $u^{**}(t)$ в форме явной зависимости $u^{**}(\bar{Q}^{**}(t), \bar{\Psi}^{**}(t))$ от соответствующих оптимальному процессу векторов \bar{Q}^{**} и $\bar{\Psi}^{**}$ модальных составляющих $Q(X, t)$ и сопряженных переменных $\bar{\Psi}(t)$ независимо от ограничений на $Q(X, t^*)$ и $z_p(t^*)$ в (1) и (5) [2].

Полученные указанным образом зависимости $u^{**}(\bar{Q}^{**}, \bar{\Psi}^{**})$ во многих случаях непосредственно устанавливают структуру искомых оптимальных алгоритмов $u^{**}(t)$ в форме их параметрического описания с точностью до вектора $\Delta^{(N)} = (\Delta_i^{(N)})$, $i = \overline{1, N}$, упорядоченной последовательности конечного числа N параметров $\Delta_1^{(N)}, \Delta_2^{(N)}, \dots, \Delta_N^{(N)}$, непосредственно характеризующих поведение управления $u^{**}(t)$ в области его определения [1-3].

Интегрирование уравнений объекта с параметризованным управлением $u(\Delta^{(N)}, t)$ приводит в таких случаях к представлению I_p , λ_p и конечного состояния $Q(X, t^*)$ в виде явных достаточно гладких зависимостей, соответственно, $I_p(\Delta^{(N)})$, $\lambda_p(\Delta^{(N)})$ и $Q(X, \Delta^{(N)})$ от $\Delta^{(N)}$, если считать известными значения I_p^* и I_p^0 в (2).

Размерность N вектора $\Delta^{(N)}$ устанавливается по известным правилам в зависимости от значения ε_0 в (1), либо априори фиксируется возможностями технической реализации $\Delta^{(N)}$ -параметризуемых управляющих воздействий [1-3].

В результате производится точная редукция задачи (4), (5), (2) к задаче полубесконечной оптимизации [6]

$$I = \lambda^0(\Delta^{(N)}) \rightarrow \min_{\Delta^{(N)}}; \\ \Phi_\Sigma(\Delta^{(N)}) = \max_{X \in V} |Q(X, \Delta^{(N)}) - Q_C| \leq \varepsilon_0, \quad (6)$$

$$\lambda_p(\Delta^{(N)}) = \frac{I_p(\Delta^{(N)}) - I_p^*}{I_p^0 - I_p^*} \leq \lambda^0, \quad p = \overline{1, q}$$

с бесконечным числом ограничений на величину $Q(X, \Delta^{(N)})$ для всех $X \in V$.
В наиболее характерном для приложений случае

$$\varepsilon_0 = \min_{\Delta^{(N)}} \varepsilon(\Delta^{(N)}) = \min_{\Delta^{(N)}} \left[\max_{X \in V} |Q(X, \Delta^{(N)}) - Q_C| \right] \quad (7)$$

задача (6) сводится [1] независимо от условий для $\lambda_p(\Delta^{(N)})$ в (6) к минимаксной задаче

$$\Phi_{\Sigma}(\Delta^{(N)}) \rightarrow \min_{\Delta^{(N)}}. \quad (8)$$

Ее решение $\bar{\Delta}^{(N)}$ обладает альтернансными свойствами [1-3], порождающими замкнутую относительно всех искомых параметров оптимального процесса систему равенств

$$\begin{aligned} |Q(X_j^0, \bar{\Delta}^{(N)}) - Q_C| &= \min \varepsilon(\Delta^{(N)}), \quad \frac{\partial}{\partial X} Q(X_{j\nu}^0, \bar{\Delta}^{(N)}) = 0; X_{j\nu}^0 \in \text{int } V, \\ j &= \overline{1, R}; R = N + 1; \nu = \overline{1, R_1}; R_1 \leq R \end{aligned} \quad (9)$$

в некоторых R точках $X_j^0 \in V$.

При наличии дополнительной информации из предметной области о конфигурации зависимостей $Q(X, \Delta^{(N)})$ на $V \ni X$, позволяющей идентифицировать значения X_j^0 и знаки разностей $Q(X_j^0, \bar{\Delta}^{(N)}) - Q_C$, соотношения (9) трансформируются к системе $N + R_1 + 1$ уравнений относительно $N + R_1 + 1$ неизвестных значений $\bar{\Delta}_i^{(N)}, i = \overline{1, N}$; $\min \varepsilon(\Delta^{(N)})$, координат $X_{j\nu}^0, \nu = \overline{1, R_1}$, точек $X_{j\nu}^0 \in \{X_j^0\}$, решение которой находится известными численными методами.

$$I_p^*$$

Величины I_p^* в (2) находятся решением по схеме альтернанского метода частных однокритериальных задач оптимизации с заданными ограничениями вида (1) при заведомо выполняющихся в условиях (7) неравенствах $\varepsilon_{0p} \geq \varepsilon_0, p = \overline{1, q}$ [6].

$$I_p^0$$

Значения I_p^0 могут быть формально определены решениями «обратных» задач на $\max I_p$ или установлены, исходя из физических соображений [6].

По найденному указанным способом вектору $\bar{\Delta}^{(N)}$ и известным зависимостям $\lambda_p(\bar{\Delta}^{(N)})$ вычисляется достигаемое в условиях (7) минимальное значение λ_{\min}^0 целевой функции в (6)

$$\lambda_{\min}^0 = \min_{\Delta^{(N)}} \lambda^0(\Delta^{(N)}) = \lambda^0(\bar{\Delta}^{(N)}) = \max_{p \in \{1, q\}} \lambda_p(\bar{\Delta}^{(N)}), \quad (10)$$

«автоматически» обеспечивая тем самым выполнение требований к $\lambda_p(\Delta^{(N)})$ в (6).

2. Задачи оптимального управления СРП с комбинированными требованиями к конечным состояниям объекта.

Наряду с задачами оптимального управления (ЗОУ), рассматриваемыми в обычных условиях единственного требования к $\Phi_{\Sigma}(u)$ вида (1), значительный теоретический и практический интерес представляет их расширенная постановка с одновременно предъявляемыми различными ограничениями на оцениваемые в равномерной метрике конечные состояния объекта, отличающимися друг от друга как формами их функционального представления $F(Q(X, t^*))$, так и видами эталонных распределений по пространственным координатам $Q_k^{**}(X)$.

$$\Phi_k(u) = \max_{X \in V} |F_k(Q(X, t^*)) - Q_k^{**}(X)| \leq \varepsilon_k, k = \overline{1, w}; w > 1. \quad (11)$$

Подобные ЗОУ СРП возникают, в частности, применительно к техническим объектам с распределенными параметрами, функционирующим в составе технологических комплексов, взаимосвязи между элементами которых диктуют необходимость перехода к векторному варианту (11).

Так, например, в ЗОУ температурными режимами предварительного нагрева металлических полуфабрикатов в технологических комплексах обработки давлением [7] вместе с требованиями к точности равномерного приближения $Q(X, t^*)$ к Q_C в (1) во многих случаях следует с позиций системного подхода учитывать ограничение на ошибку отклонения $Q(X, t^*)$ от желаемого стационарного состояния объекта [8] на возможном этапе терmostатирования перед передачей обрабатываемых изделий к деформирующему оборудованию или(и) дополнительное ограничение на погрешность приближения средней на каждом элементе пространственной области температуры к ее заданной величине, обеспечивающей минимальное энергопотребление на последующей стадии пластического формоизменения [9].

В однокритериальном варианте с $q = 1$ в (1), рассматриваемом далее для простоты без потери общности получаемых основных результатов, ЗОУ СРП с комбинированными ограничениями (11) сводится после параметризации искомых управлений подобно (6) к ЗПО следующего вида

$$I(\Delta^{(N_0)}) \rightarrow \min_{\Delta^{(N)}}; \\ \Phi_k(\Delta^{(N)}) = \max_{X \in V} |F_k(Q(X, \Delta^{(N)})) - Q_k^{**}(X)| \leq \varepsilon_k; k = \overline{1, w}; w > 1. \quad (12)$$

Условия $\Phi_k(\Delta^{(N)}) \leq \varepsilon_k, k = \overline{1, w}$, в (12) можно записать в форме

$$\Phi_{\Sigma}(\Delta^{(N)}) = \max_{k \in \{1, w\}} \left\{ \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k} \Phi_k(\Delta^{(N)}) \right\} \leq \varepsilon_0 \quad (13)$$

для любого из значений $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\eta}, \eta \in \{1, w\}$.

В силу известных свойств решений задач линейного программирования с целевой функцией $L(\bar{a}, \Delta^{(N)})$ переменных $a_k, k = \overline{1, w}$, получим, что

$$L(\bar{a}, \Delta^{(N)}) = \max_{a_k} \left[\sum_{k=1}^w a_k \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k} \Phi_k(\Delta^{(N)}) : \bar{a} = (a_k) \in A_w = \left\{ a_k \geq 0, \sum_{k=1}^w a_k = 1 \right\} \right] = \\ = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{k_j}} \Phi_{k_j}(\Delta^{(N)}) = \Phi_{\Sigma}(\Delta^{(N)}) \quad (14)$$

при некоторых

$$k = k_j \in \{\overline{1, w}\}, a_{k_j} = 1, j = \overline{1, w_1}; 1 \leq w_1 \leq w, \quad (15)$$

где $w_1 \geq 1$ - число активных ограничений в (12).

В таком случае ЗПО (12) приводится к типовому виду [1] с единственным ограничением

$$I(\Delta^{(N)}) \rightarrow \min_{\Delta^{(N)}},$$

$$\Phi_0(\Delta^{(N)}) = \max_{y \in V_1} \sum_{k=1}^w a_k \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k} |F_k(Q(X, \Delta^{(N)}) - Q_k^{**}(X)| \leq \varepsilon_0, \quad (16)$$

которое следует рассматривать на расширенном множестве $V_1 = V \times A_w$ элементов $y = (X, \bar{a})$, содержащем, наряду с пространственными переменными $X \in V$, коэффициенты $a_k \in A_w$ в (14).

Альтернансы свойства решений $\bar{\Delta}^{(N)}$ задачи (16) [1-3] приводят, подобно (9), к замкнутой относительно всех искомых неизвестных системе соотношений для активных $w_1 \leq w$ ограничений в (12):

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{k_j}} |F_{k_j}(Q(X_{k_j r_j}, \bar{\Delta}^{(N)}) - Q_{k_j}^{**}(X_{k_j r_j})| = \varepsilon_0, \quad r_j = \overline{1, R_j}; \quad j = \overline{1, w_1}; \quad k_j \in \{\overline{1, w}\}, \quad (17)$$

выполняемых в отличающихся друг от друга для различных значений j точках

$X_{k_j r_j}, r_j = \overline{1, R_j}$, суммарное число которых $\sum_{j=1}^{w_1} R_j$ оказывается равным числу всех искомых параметров оптимального процесса.

Дальнейшие процедуры редукции равенств (17) к системам уравнений для определения этих неизвестных по схеме альтернанского метода с существенным использованием закономерностей предметной области усложняются необходимостью предварительного определения номеров $k_j, j = \overline{1, w_1}$, активных ограничений в (17).

Можно предложить следующий алгоритм решения задачи (16) в этих условиях.

На первом этапе по типовой схеме [1-3] решаются альтернанским методом последовательно w задач (12) для всех $k = 1, 2, \dots, w$ с учетом в каждой из них только одного k -го ограничения и системы альтернанских равенств

$$|F_k(Q(X_{kr}, \Delta^{[k]})) - Q_k^{**}(X_{kr})| = \varepsilon_k, \quad r = \overline{1, R_k}, \quad (18)$$

к которой сводятся в данном частном случае соотношения (17).

По полученным решениям $\Delta^{[k]}$ проверяются неравенства

$$\max_{X \in V} |F_h(Q(X, \Delta^{[k]})) - Q_h^{**}(X)| \leq \varepsilon_h, \quad \forall h \in B_k = \{1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, w\} \quad (19)$$

для остальных ограничений. Если при некотором $k = p \in \{\overline{1, w}\}$ выполняются все условия (19), то найденная величина $\Delta^{[p]}$ есть искомое решение $\bar{\Delta}^{(N)}$ исходной задачи (12).

Если хотя бы одно из $w-1$ неравенств (19) не выполняется для всех $k = \overline{1, w}$, то необходимо перейти к следующему этапу вычислительного алгоритма, реализуемого по предложенной в [1] итерационной процедуре применительно к задаче (16) с числом $w_1 > 1$ активных ограничений.

Искомый вектор параметров определяется при этом по ходу решения последовательности задач вида (16) с целевой функцией $I(\Delta^{(N)})$ и ограничением

$$\Phi(\bar{\Delta}^{(N)}) = \max_{y \in V_1} \sum_{k=1}^w a_k q_k |F_k(Q(X, \bar{\Delta}^{(N)})) - Q_k^{**}(X)| \leq \varepsilon'; q_k = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k} \quad (20)$$

для ряда фиксированных значений ε' вместо ε_0 в (16), убывающих с малым шагом $d\varepsilon > 0$ вплоть до заданной величины ε_0 . При этом значения множителя q_k в (20) априори фиксируются исходными условиями (12), (13). В каждой из таких задач по известным правилам [1] в зависимости от ε' определяется размерность N вектора $\bar{\Delta}^{(N)}$, а характер распределения функций $q_k(F_k(Q(X, \bar{\Delta}^{(N)})) - Q_k^{**}(X))$, $k = \overline{1, w}$, в пространственной области $V \ni X$, однозначный выбор $w_1 > 1$ равенств вида (17)

$$q_{k_j} |F_{k_j}(Q(X_{k_j r_j}, \bar{\Delta}^{(N)})) - Q_{k_j}^{**}(X_{k_j r_j})| = \varepsilon', r_j = \overline{1, R_j}, j = \overline{1, w_1} \quad (21)$$

и точек $X_{k_j r_j}$ устанавливаются для каждого $\varepsilon' = \varepsilon''$ по результатам предыдущего шага с $\varepsilon' = \varepsilon'' + d\varepsilon$ с учетом непрерывности по ε' искомых решений $\bar{\Delta}^{(N)}(\varepsilon')$ и $F_k(Q(X, \bar{\Delta}^{(N)}(\varepsilon'))) - Q_k^{**}(X) \forall X \in V, k = \overline{1, w}$

Указанная вычислительная процедура начинается с «отправного» значения $\varepsilon' = \varepsilon_{\min}^{(N)}, N = 1$, где подобно (7)

$$\varepsilon_{\min}^{(N)} = \min_{\Delta^{(N)}} \left\{ \max_{y \in V_1} \sum_{k=1}^w a_k q_k |F_k(Q(X, \Delta^{(N)})) - Q_k^{**}(X)| \right\}, q = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k} \quad (22)$$

При этом конфигурация на $V \ni X$ разностей $q_k(F_k(Q(X, \bar{\Delta}^{(1)})) - Q_k^{**}(X))$, $k = \overline{1, w}$, как правило, может быть определена в этой типичной для приложений ситуации на основании дополнительной информации об известных закономерностях оптимизируемых процессов, после чего идентификация равенств (21) для $N = 1$ осуществляется сравнительным анализом величин слагаемых

$$\max_{X \in V} \left\{ q_k |F_k(Q(X, \bar{\Delta}^{(1)})) - Q_k^{**}(X)| \right\} \quad (23)$$

в сумме (22) с заданными множителями q_k при $N = 1, a_k = 1$ для всех $k = \overline{1, w}$.

В итоге на некотором шаге при $\varepsilon' = \varepsilon_0$ величина $\bar{\Delta}^{(N)}(\varepsilon')$ является искомым решением исходной задачи (16) с $w_1 > 1$ активными ограничениями или эта задача может оказаться неразрешимой, если выполняется неравенство $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_{\inf} = \min_N \varepsilon_{\min}^{(N)} = \varepsilon_{\min}^{(\rho)}, \rho \leq \infty$ для нижней грани ε_{\inf} значений $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ в (22) [1].

3. Задачи многоканального управления системами с распределенными параметрами. Целый ряд актуальных задач для приложений ЗОУ СРП формулируется в условиях одновременного воздействия на объект по различным каналам управления

Самостоятельный достаточно общий класс задач подобного типа возникает для $\sigma > 1$ взаимосвязанных СРП [10] с использованием управляющих воздействий $U(t)$

$$U(t) \in \{u_m(t) : u_m(t) \in \{u_{Vm}(t), u_{Sm}(t)\}; u_{m\min} \leq u_m(t) \leq u_{m\max}; \\ u_{Vm}(t) = (u_{Vml}), l = \overline{1, l_{Vm}}; u_{Sm}(t) = (u_{Sml}), l = \overline{1, l_{Sm}}; m = \overline{1, \sigma}; \sigma > 1\} \quad (24)$$

в виде совокупности различных для каждого m -го объекта ($m \in \{\overline{1, \sigma}\}$) векторных сосредоточенных внутренних $u_{Vm}(t)$ или граничных $u_{Sm}(t)$ управляющих воздействий с фиксированным характером их пространственного распределения, где для простоты исключается случай их совместного применения.

Частный случай $\sigma = 1$ в (24) соответствует задаче векторного управления одним объектом.

С помощью аналитических условий оптимальности может быть получено подобно предыдущим задачам параметрическое представление каждой l -ой компоненты искомых управлений $u_m(t)$ в (24) с точностью до однозначно характеризующего управляющие воздействия $u_m(t)$ оптимальной структуры вектора $\Delta_l^{(N_{lm})} = (\Delta_{lk}^{(N_{lm})}), l = \overline{1, l_m}; l_m \in \{l_{Vm}, l_{Sm}\}; k = \overline{1, N_{lm}}$, определенным образом упорядоченной последовательности конечного числа N_{lm} параметров

$$\Delta_{lk}^{(N_{lm})}, \text{ общее количество которых равно } N = \sum_{m=1}^{\sigma} \sum_{l=1}^{l_m} N_{lm}.$$

В итоге, аналогично (12), осуществляется редукция исходной ЗОУ к ЗПО следующего вида:

$$I(\Delta^\Sigma) \rightarrow \min_{\Delta^\Sigma} \max_{X_m \in V_m} |Q_m(X_m, \Delta^\Sigma) - Q_m^{**}(X_m)| \leq \varepsilon_m, m = \overline{1, \sigma}, \quad (25)$$

где $\Delta^\Sigma = (\Delta_l^{(N_{lm})}), m = \overline{1, \sigma}; l = \overline{1, l_m}$ и ε_m - заданная точность равномерного приближения конечного состояния m -ой управляемой величины $Q_m(X_m, \Delta^\Sigma)$ к требуемому $Q_m^{**}(X_m)$ в пространственной области V_m изменения пространственных координат X_m m -го объекта в системе взаимосвязанных СРП.

Решение задачи (25) по технологии альтернативного метода [1-3] существенно усложняется по сравнению с одноканальным управлением увеличенной размерностью вектора Δ^Σ , многовариантным набором правил выбора чисел N_{lm} в этих условиях; специфическим требованием одинаковой длительности процесса управления для всех компонентов управляющих воздействий и необходимостью идентификации конфигураций оптимальных конечных пространственных распределений каждой из управляемых величин в условиях их зависимости от всех управлений.

Например, в характерной задаче двухканального оптимального по быстродействию управления линейной одномерной моделью СРП при $\sigma = 2, l_m = 1$ размерность $\tilde{N}_1 + \tilde{N}_2$ вектора $\Delta^\Sigma = \Delta^{(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2)}, \tilde{N}_1 = N_{11}, \tilde{N}_2 = N_{12}$ моментов переключения оптимальных управлений релейной формы, включая общий для обоих управляющих воздействий конечный момент времени t^* , определяется согласно [1] по месту заданных в (25) значений $\varepsilon_m, m = \overline{1, 2}$, в цепочке неравенств

$$\varepsilon_{m\min}^{(1,1)} > \varepsilon_{m\min}^{(2,2)} > \dots > \varepsilon_{m\min}^{(\xi-1, \xi-1)} > \max(\varepsilon_{m\min}^{(\xi-1, \xi)}, \varepsilon_{m\min}^{(\xi, \xi-1)}) \geq \min(\varepsilon_{m\min}^{(\xi-1, \xi)}, \varepsilon_{m\min}^{(\xi, \xi-1)}) > \\ > \varepsilon_{m\min}^{(\xi, \xi)} > \dots > \varepsilon_{m\min}^{(\rho_m, \rho_m)} = \varepsilon_{m\inf} \geq 0, m \in \{1, 2\}, \quad (26)$$

где подобно (7)

$$\varepsilon_{m \min}^{(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2)} = \min_{\Delta^{(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2)}} \left\{ \max_{x_m \in [x_{0m}, x_{1m}]} \left| Q_m(x_m, \Delta^{(\tilde{N}_1, \tilde{N}_2)}) - Q_m^{**}(x_m) \right| \right\}, m \in \{1, 2\} \quad (27)$$

Здесь точная нижняя грань ε_{\inf} в (26) оказывается равной минимаксу $\varepsilon_{m \min}^{(\rho_m, \rho_m)}$, где $\rho_m = \infty$ при $\varepsilon_{m \inf} = 0$ и $\rho_m < \infty$ при $\varepsilon_{\inf} > 0$ соответственно для управляемых и неуправляемых относительно $Q_m^{**}(x_m)$ объектов в (25) [1].

В соответствии с (26) устанавливается набор правил для определения \tilde{N}_1 и \tilde{N}_2 [1]:

$$\tilde{N}_1 = \tilde{N}_2 = \xi, \text{ если } \varepsilon_{m \min}^{(\xi, \xi)} \leq \varepsilon_m < \min(\varepsilon_{m \min}^{(\xi-1, \xi)}, \varepsilon_{m \min}^{(\xi, \xi-1)});$$

$$\tilde{N}_1 = \xi, \tilde{N}_2 = \xi-1, \text{ если } \varepsilon_{m \min}^{(\xi, \xi-1)} \leq \varepsilon_m < \varepsilon_{m \min}^{(\xi-1, \xi)}$$

$$\text{или } \varepsilon_{m \ min}^{(\xi-1, \xi)} < \varepsilon_{m \ min}^{(\xi, \xi-1)} \leq \varepsilon_m < \varepsilon_{m \ min}^{(\xi-1, \xi-1)};$$

(28)

$$\tilde{N}_1 = \xi-1, \tilde{N}_2 = \xi, \text{ если } \varepsilon_{m \ min}^{(\xi-1, \xi)} \leq \varepsilon_m < \varepsilon_{m \ min}^{(\xi, \xi-1)}$$

$$\text{или } \varepsilon_{m \ min}^{(\xi, \xi-1)} < \varepsilon_{m \ min}^{(\xi-1, \xi)} \leq \varepsilon_m < \varepsilon_{m \ min}^{(\xi-1, \xi-1)}.$$

где $m = 1$ или $m = 2$. При этом появляется дополнительная неизвестная, соответственно величина ε_2^* или ε_1^* достигаемой точности равномерного приближения вместо заданных в (25) величин ε_2 или ε_1 , определяемая при решении ЗПО (25) альтернативным методом с вычислением \tilde{N}_1 или \tilde{N}_2 согласно (28) и включением момента окончания процесса управления t^* в число искомых параметров \tilde{N}_1 или \tilde{N}_2 соответственно.

Приводятся примеры решения предлагаемыми методами векторных задач управления ответственными объектами технологической теплофизики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с.
2. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 677 с.
3. Плещивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2009. №3. С. 22-33.
4. Корнеенко В.П. Методы оптимизации. –М.: Высшая школа, 2007. – 664 с.
5. Машунин Ю.К. Методы и модели векторной оптимизации. М.: Наука, 1986. – 141 с.
6. Рапопорт Э.Я., Плещивцева Ю.Э. Технология решения многокритериальных задач управления системами с распределенными параметрами // Автометрия, 2017. Т.53. № 4. С. 3-15.
7. Плещивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Совместная оптимизация по системным критериям качества взаимосвязанных процессов технологической теплофизики в производственных комплексах обработки металла давлением // Автометрия, 2013. Т. 49. № 6. С. 3-13.
8. Рапопорт Э.Я. Минимаксная оптимизация стационарных состояний в системах с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления, 2013, №2. С. 3-18.
9. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1981. 271 с.
10. Рапопорт Э.Я. Программная управляемость взаимосвязанных неоднородных систем с распределенными параметрами // Изв. РАН. Теория и системы управления, 2017. № 4. С. 11-24

Санкин Александр Викторович, Алтухов Виктор Иванович

Северо-Кавказский федеральный университет

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОВЕРШЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ СИНЕРГЕТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Аннотация. Новые силовые полупроводниковые приборы предполагают их работу в экстремальных условиях эксплуатации - высокие температуры, давления, радиационная стойкость и другие. Современные силовые электронные ключи не должны терять заявленных свойств до 400–500°C. По результатам исследований фирмы CREE можно утверждать, что в настоящее время основным перспективным материалом силовой электроники является именно карбид кремния. Получение совершенных монокристаллов SiC и повышение качества устройств на основе SiC требует автоматизации технологического процесса. В работе предлагаются конструктивные решения установки индукционного нагрева и математическая модель процессов сублимации совершенных монокристаллов SiC.

Ключевые слова: карбид кремния; совершенные монокристаллы SiC; технология индукционного нагрева.

Annotation. New power semiconductor devices are intended for work under extreme operating conditions, high temperature, pressure, radiation resistance and others. Modern power electronic keys must not lose the claimed properties to 400-500 °C. According to the research company CREE, it could be argued that at present the main prospective power electronics material is Silicon Carbide. Obtaining perfect monocrystals of SiC and improving the quality of SiC-based devices require automation of technological process. Suggested constructive solutions induction heating installation and mathematical model of sublimation processes committed by SiC single crystals.

Keywords: silicon carbide; committed SiC single crystals; induction heating technology.

I. Применяемые технологии получения кристаллического SiC

Получение совершенных монокристаллов карбида кремния (SiC) является необходимой составляющей производства диодов, транзисторов, микросхем и спецприборов, как элементной базы силовой, экстремальной микроэлектроники. Эффективные транзисторы, диоды и светодиоды на основе SiC уже широко используются на транспорте, во многих энергосберегающих технологиях, силовых приборах и осветительных устройствах. Это связано с тем, что карбид кремния обладает уникальными свойствами, такими как химическая инертность, термическая устойчивость, высокая теплопроводность, высокое напряжение электрического пробоя, механическая прочность и другими важными для электроники характеристиками [1]. Совершенные монокристаллы SiC являются незаменимыми материалами при изготовлении подложек, буферных слоев, пленок в упомянутых выше устройствах и приборах силовой электроники.

Технология получения таких кристаллов уже имеет свою историю. Отметим ряд наиболее известных ее вариантов. Так, достаточно простая, но часто применяемая технология прямого омического нагрева, для получения монокристаллов SiC, путем выращивания его из газовой фазы, выглядит следующим образом: в ростовой камере (тигеле), размещают параллельно, снизу вверх, испаряющую поверхность источника SiC и ростовую поверхность затравочного монокристаллического SiC, расположенного на графитовом держателе. В ростовой камере создается поле рабочих температур в диапазоне 2500-2600 °C с осевым градиентом от затравочного монокристалла к источнику [2]. Недостатком этого метода, реализуемого путем сильнотокового (более 1000A) омического нагрева, является отсутствие надежного контроля и управления за величинами градиентов полей температур в ростовой камере. Как следствие, в образцах появляется большое количество механических напряжений и примесей.

Известно также устройство для реализации сублимационного выращивания монокристаллов карбида кремния [3]. Данное устройство предусматривает размещение источника карбида кремния

(в частности, поликристаллического карбида кремния) в нижней части ростовой камеры и герметизацию ростовой камеры с помощью верхней крышки, на которой закреплен затравочный кристалл. Для выращивания кристалла карбида кремния температура затравочного кристалла поддерживается ниже, чем температура источника карбида кремния. В этом данной технология подобна вышеприведенной. Однако, температура источника карбида кремния и затравочного кристалла контролируются оптическим пирометром через отверстия в теплоизоляции, диаметр которых значительно меньше диаметра затравочного кристалла. Наличие таких пирометрических отверстий практически не влияет на температуру затравочного кристалла. Использование этого устройства позволяет стабилизировать 4H-SiC политип за счет использования в процессе роста церия или его соединений в качестве добавок. Однако, вследствие того, что требуемое распределение рабочих температур внутри ростовой камеры, а также градиент температур внутри кристалла в процессе роста в этом устройстве обеспечиваются только нагревателем в основании ростовой камеры, возможности регулирования режимами сублимации кристалла весьма ограничены.

Более прогрессивной по совокупности основных признаков является технология для выращивания монокристаллов карбида кремния, представленная в патенте [4]. Эта технология включает также параллельное размещение в ростовой камере, снабженной теплоизоляцией, одна напротив другой испаряющей поверхности источника карбида кремния и ростовой поверхности затравочного кристалла. Однако, здесь необходимое распределение рабочих температур в ростовой камере обеспечивается не только нагревом ростовой камеры нагревателем, но и дополнительно за счет охлаждения затравочного кристалла через пирометрическое отверстие в теплоизоляции ростовой камеры, диаметр которого приблизительно равен диаметру затравочного кристалла. Такие условия создания температурного градиента внутри ростовой камеры позволяют расширить диапазон режимов выращивания кристаллов и, как следствие, повысить скорость их роста, а также оказывать влияние на геометрическую форму кристалла. Однако, после завершения процесса роста, в процессе охлаждения теплоотвод через пирометрическое отверстие в тепловой изоляции ростовой камеры продолжает оказывать влияние на температурный градиент в выращенном монокристалле, что сопровождается возрастанием в нем механических напряжений на разрыв и на срез. При этом возрастание механических напряжений в монокристалле на разрыв и на срез приводит к образованию в нем трещин и дислокаций.

Главный недостаток представленных технологий с целью получения совершенных монокристаллов SiC состоит в отсутствии возможности надежного контроля за величинами рабочих градиентов температур. В связи с этим в настоящей работе предлагается новое техническое решение, в виде устройства для реализации получения монокристаллов SiC методом синергетически управляемого высокотемпературного индукционного нагрева. Предложенное устройство содержит следующие основные положения [13]:

- введение дополнительных колебательных контуров, позволяющих управлять процессом сублимации путем изменения электрических и пространственных параметров в схеме индукционного нагрева;
- применение метода последовательных приближений (итераций) с последующей статистической обработкой предварительных измерений текущих температур для обеспечения оптимального режима сублимации.

Структура устройства для получения совершенных монокристаллов карбида кремния показана на рисунке 1. Дополнительный колебательный контур (4) позволяет поддерживать необходимые градиенты температур с высокой точностью за счет подстроек конденсаторов, обеспечивающих резонансный режим с индуктором (3) – основным колебательным контуром. Стабильность режима сублимации поддерживается путем изменения электрических и пространственных параметров дополнительных управляемых колебательных контуров.

В зоне роста создаются стабильные поля рабочих температур с осевым градиентом в направлении от затравочного кристалла (5) к источнику карбида кремния (1). Это обеспечивает равномерное испарение источника карбида кремния и его кристаллизацию из паровой фазы на ростовой поверхности затравочного кристалла. Равномерный рост кристаллов обеспечивается

посредством сублимации из газовой фазы паров SiC в ростовой камере тигля за счет поддержания стабильных градиентов температур в ростовой камере и постоянных значений температуры около поверхности затравочного кристалла. Тигель (2) предлагаемого устройства содержит корпус и крышку с пьедесталом, на котором закрепляется затравка SiC. В основании корпуса тигля размещается источник (1) паров чистого карбида кремния SiC. В результате, выращиваемый монокристаллический SiC, при наличии стабильных градиентов температуры начинает равномерно расти как однородное продолжение пьедестала, обладая высокой степенью совершенства.

II. Моделирование процессов роста монокристаллов SiC

Ниже рассмотрены вопросы численного моделирования и управления тепловыми полями при выращивании монокристаллов SiC сублимационным методом. Для решения поставленных задач необходимо было выявить закономерности процессов нагрева и роста кристаллов SiC на различных стадиях технологического цикла с помощью построения математической модели этих процессов и проведения вычислительного эксперимента.

2.1. Этапы решения задачи

Среди основных и наиболее важных аспектов изучения закономерностей тепловых процессов при выращивании монокристаллов SiC необходимо определить распределение температуры в ростовой ячейке. Это позволит создать оптимальные условия роста монокристаллов SiC для снижения плотности дефектов и провести изучение влияния конвекции газовой смеси на распределение основных газовых компонентов, ответственных за кристаллизацию, и, как следствие, на скорость роста и форму фронта роста слитка SiC [7,8].

Рассмотрим конвекцию многокомпонентной газовой смеси в цилиндрической полости (рис. 1). Ростовая полость наполнена инертным газом (аргоном) под давлением P_{Ar} . Источником паров является измельченный порошок из SiC (1), засыпанный в графитовый стакан 2 так, что расстояние от поверхности засыпки до затравки (5) равно H . Сверху стакан закрывается крышкой с закрепленной на ней затравкой [9].

Конвективное движение многокомпонентной газовой смеси в реакторе с цилиндрической симметрией будем описывать уравнением теплопроводности. В переменных Ψ — ω , где Ψ — функция тока, а ω — вихрь, исходная система уравнений Новье-Стокса процесса сублимации имеет следующий вид [5, 6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \dot{O}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r T) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \chi(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\chi(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \psi \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi \equiv -\omega, \quad \omega = \frac{\partial}{\partial z} v_r - \frac{\partial}{\partial r} v_z, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$v_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad v_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}. \quad (2)$$

$$(3)$$

$V = (v_r, v_z)$ — скорость течения, T — температура, $\chi(T)$ — коэффициент температуропроводности.

Расчетная область для уравнения (1) покрывает половину (от оси до боковой стенки) осевого сечения ростовой ячейки. Для этой области рассматривается внутренняя краевая задача, решение которой должно удовлетворять граничным условиям:

1) на твердых стенках:

$$\Psi|_b = \frac{\partial \Psi}{\partial n}|_b = const, \quad T|_b = T(\xi), \quad \varphi^{(i)}(T) \frac{\partial c^{(i)}}{\partial n}|_b = q^{(i)}(\xi), \quad (4)$$

где ξ - текущая координата;

2) на оси симметрии:

$$\Psi|_{r=0} = 0, \omega|_{r=0} = 0, \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=0} = 0, \left. \frac{\partial^2 c^{(i)}}{\partial r^2} \right|_{r=0} = 0. \quad (5)$$

Границные условия для вихря ω на твердых стенках определяются в конечно-разностном виде.

2.2. Численное решение системы уравнений (1)-(3) тепло-массопереноса

Для численного решения системы (1)-(3) используется постоянный шаг по времени τ , а расчетная область покрывается равномерной по z и r сеткой:

$$\Omega_h = \{z_i, 0 \leq i \leq \dim Z; r_j, 0 \leq j \leq \dim R\},$$

для которой $h_i = z_{i+1} - z_i$ - постоянный шаг по z ; $h_j = r_{j+1} - r_i$ - постоянный шаг по r ; $\dim Z + 1$ - количество точек на образующей боковой стенки реактора; $\dim R + 1$ — количество точек по r на основании реактора. Все переменные считаются определенными в узлах сетки. Исходная система уравнений (1) аппроксимируется на сетке Ω_h , продольно-поперечной схемой в операторном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{T} - T}{\tau/2} &= L_r \left[\frac{1}{r}, r\chi(T), 1 \right] \bar{T} - k_r \left(\frac{1}{r}, rv_r \right) \bar{T} + L_z [1, r\chi(T), 1] T - k_z (1, v_z) T, \\ \frac{\hat{T} - \bar{T}}{\tau/2} &= L_r \left[\frac{1}{r}, r\chi(T), 1 \right] \bar{T} - k_r \left(\frac{1}{r}, rv_r \right) \hat{T} + L_z [1, r\chi(T), 1] \hat{T} - k_z (1, v_z) \hat{T}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь T - температура на n слое; \bar{T} – то же на слое $n+1/2$; \hat{T} – то же на слое $n+1$; L_r - оператор соответствующего дифференцирования.

Границные условия по температуре задавались фиксированными по внутренним стенкам графитового стакана и по поверхности засыпки (см. рис. 1). Особенности конструкции тигля в реальной установке для выращивания монокристаллов SiC учитывались с помощью задания различных граничных условий по температуре. Кроме того, при моделировании процессов тепло- и массопереноса в газовом объеме на различных стадиях роста, когда растущий кристалл заполняет часть исходного объема ячейки роста, решалось уравнение Фурье для определения температуры фронта роста.

В литературе встречаются различные данные по температурным зависимостям парциальных давлений указанных газовых компонентов [10,11], поэтому расчеты проводились для всех известных данных. Кроме этого учитывалось изменение условий роста в течение технологического цикла выращивания монокристалла SiC в результате уменьшения газового объема в ростовой ячейке, а также графитизация поликристаллической засыпки.

Уравнение (2) решается последовательными прогонками. Алгоритм решения подобной математической задачи подробно описан в работе [12].

Моделирование тепловых процессов проводилось для различных условий выращивания кристаллов SiC: давление аргона $P_{Ar} = 10^{-3} \div 1 \text{ atm}$, температура роста $T = 2400 \div 2700 \text{ K}$, осевой градиент температуры $gradT = 20 \div 30 \text{ K}/\text{mm}$. Размеры расчетной области, покрываемой сеткой Ω_h , составляют $R = 1.5 \div 2 \text{ mm}$, $I = 1 \div 3 \text{ mm}$. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что для указанных условий роста и конфигурации реактора, используемого в реальной установке, влияние конвекции на теплообмен незначительно. Заметным это влияние становится при $P_{Ar} \geq 1.5 \text{ atm}$.

Изменение распределения температуры в процессе роста приводит к нелинейной зависимости осевого распределения температуры с параболической аппроксимацией. Высокая теплопроводность монокристаллического карбида кремния обуславливает незначительное отличие температуры фронта роста кристалла от температуры графитовых стенок реактора. Это приводит к увеличению осевого градиента температуры в газовой среде ячейки.

III. Заключение

В данной технологии стабильные значения градиентов температур ($1\text{--}4^{\circ}\text{C}/\text{мм}$) обеспечиваются с высокой точностью предварительными измерениями текущих температур, с накоплением их значений в базе данных с последующей статистической обработкой для обеспечения оптимального режима сублимации.

Необходимая точность регулирования и стабилизация сублимационного процесса по градиентам температур достигается методом статистической обработки предварительных измерений их текущих величин с выявлением и фиксацией в базе данных опытных значений рабочих температур. Найденные значения рабочих температур позволяют с высокой точностью поддерживать требуемое значение градиентов температуры с целью поддержания стабильного режима сублимации. В предложенной технологической схеме требуемая точность управления и возможность регулирования обеспечиваются воздействием (в том числе индуктивном) на параметры устройства в автоматическом и устойчивом по типу атTRACTора, синергетическом режиме.

Практическое использование этой технологии не ограничивается получением совершенных монокристаллов кремния, а может быть реализовано и для получения других кристаллов тугоплавких материалов, например нитридов.

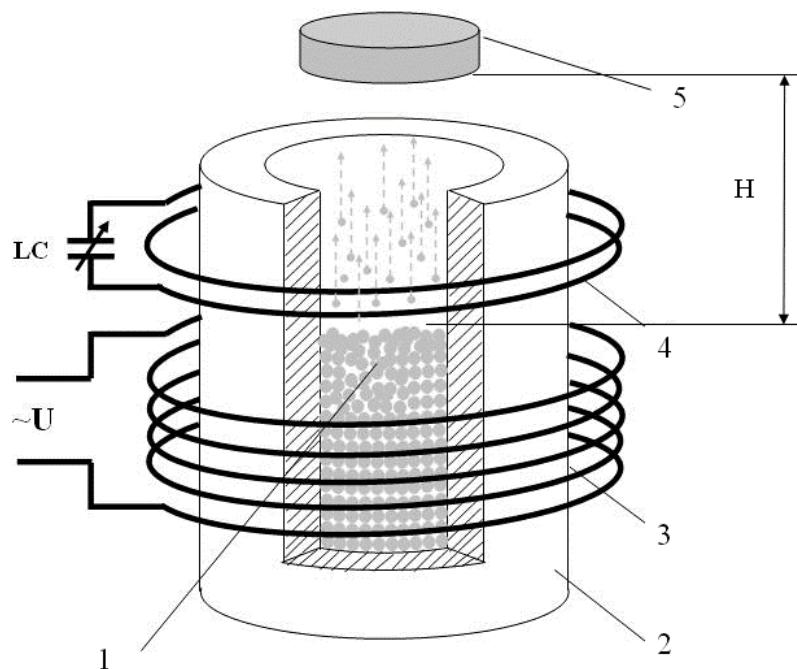


Рисунок 1 – Схема устройства для получения совершенных монокристаллов карбида кремния (SiC) с использованием высокотемпературного нагрева.

1 - источник с шихтой карбида кремния; 2 - корпус ростовой камеры (тигель); 3 - индуктор (индукционная катушка); 4 - дополнительный колебательный контур; 5- затравочный монокристалл.

Создание приборов нового поколения силовой экстремальной электроники на основе карбида кремния служит компонентной базой создания устройств с уникальными характеристиками для развития таких приоритетных отраслей экономики как авиа-, судо-, авто- и ракетостроение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнесин Г.Г. «Карбидокремниевые материалы». М., 1977.
2. Греков И.В. «Силовая электроника на основе карбида кремния». Письма в ЖТФ. т.28 №3, 2002г.
3. US Patent Application Publication № 2009/053125, published Feb. 26, 2009, «Stabilizing 4H Poly type During Sublimation Growth of SiC Single Crystals».
4. US Patent № 6428621, published August 6, 2002, «Method for growing low defect density siliconcarbide».
5. O. Klein and P. Philip, "Correct voltage distribution for axisymmetric sinusoidal modeling of induction heating with prescribed current, voltage, or power," IEEE Trans. Mag., vol.38, no. 3, pp. 1519-1523, May 2002.
6. Лебедев А.А. Вечнозеленый полупроводник. Химия и жизнь, №4, 2006. с. 14-19.
7. Сафаралиев Г.К., Таиров Ю.М., Цветков В.Ф., Шабанов Ш.Ш., Пашук Е.Г. Офицерова Н.В., Авров Д.Д., Садыков С.А. Получение и свойства поликристаллических твердых растворов *SiC-AlN* //ФТП. Т.27, вып.3 1993 С.402-408.
8. Синельников Б.М., Тарака В.А., Оспищев М.А., Шипилов В.М. Выращивание монокристаллов карбида кремния на технологическом оборудовании под управлением аппаратно-программного комплекса на основе среды графического программирования LabView.
9. Кириллов Б.А., Бакин А.С., Солнышкин С.Н., Таиров Ю.М. Моделирование тепло- и массопереноса в процессе роста монокристаллов карбида кремния // ФТП. Т.31, вып. 7 1997 С.794-799.
10. J. Drowart, G. De Maria. Silicon Carbide – a High Temperature Semiconductor (N.Y., Pergamon Press, 1960) p.16.
11. Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. Изв. АН СССР. Неорг. матер., 13, 1606 (1976).
12. Б.П. Герасимов, А.В. Лесуновский, В.В. Митин, Т.А. Борисова, Д.Я. Ровенский. В сб.: Численные методы, под ред. А.А. Самарского (М., Наука, 1989) с.112.
13. Заявка № 2017105577/05(009982). Решение о выдаче патента на полезную модель. Дата начала срока действия патента 20.02.2017

Уткин Владимир Александрович (1), Першин Иван Митрофанович (1),
Головкин Сергей Иванович (2), Кухарова Татьяна Валерьевна (1),
Папуши Елена Гавриловна (1)

1. Северо-Кавказский федеральный университет
2. Кемеровская государственная медицинская академия

ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИКИ МЕТАБОЛИЗМА В ЖИВОЙ СИСТЕМЕ ИСХОДЯ ИЗ КАНОНОВ МЕДИЦИНСКИХ КЛАССИФИКАЦИЙ

Аннотация. Динамика развития патологии рассматривается сообразно распределению состояний пациента по степени тяжести. Диагностируемые состояния разграничиваются методами дискриминантного анализа. Пространство состояний объекта отображается в проекции притяжения простых классифицирующих функций.

Ключевые слова: идентификация динамики болезни, пространство состояний, дискриминантный анализ, простые классифицирующие функции.

Annotation. Dynamics of pathology development is considered in accordance with the distribution of patients' state on the level of seriousness. States under diagnostics are differentiated by means of methods of discriminant analysis. Space of object states is reflected in the projection of simple classifying functions.

Keywords: identification of illness dynamics, space of states, discriminant analysis, simple classifying functions.

Задачи идентификации в отношении живых систем существенно отличны от таковых в технических системах. В первую очередь, конечно, следует отметить неизбежную неполноту представлений об особенностях всевозможных реакций живых систем, как на внешние воздействия, так и на изменения внутренней среды. Вместе с тем, врачебные назначения и манипуляции в отношении пациента обычно имеют целью обратить вспять патологические проявления и достигнуть устойчивого состояния, если и не полного здоровья, то, по крайней мере, существенно снизить вероятность возможных ухудшений. При этом весьма желательно, чтобы интенсивность управляющих воздействий постепенно снижалась и, по возможности, в итоге они могли бы быть полностью исключены.

Вполне очевидно, что траектории ухода в болезнь в отображении динамики величин соответствующих параметров не схожи с таковыми в отображении хода реконвалесценции, что отчасти напоминает петлю гистерезиса. Следует так же отметить, что в медицине под динамикой часто понимают всего лишь результаты сопоставления параметров наблюдений на момент начала и в конце лечения, а вовсе не процесс, не выражение их зависимости от времени. При этом совсем не обязательно, что наблюдаемые параметры представлены только лишь интервальными переменными, и, по определению, не могут быть сброшены со счета номинальные переменные, отражающие наличие или отсутствие некоторых симптомов или же ранжированные данные, выражающие интенсивность или степень тяжести тех или иных проявлений патологии [5]. Для многих параметров наблюдений весьма не редко совсем не известен масштаб времени их изменений, что в норме, что в патологии, а характер динамики лишь в исключительно редких случаях может быть представлен в виде функции, с тем или иным приближением аппроксимирующей реальный процесс.

Но надо отметить, что многие, основанные на патогенетических представлениях медицинские классификации контекстно скрывают внутри себя фактор времени. В самом деле, если исключить из рассмотрения случаи т.н. «внезапных», чаще травматических поражений, то, видимо, можно считать оправданным предположение о том, что диагнозы, выражающие степень тяжести патологии чередуются последовательно, как правило, от здорового – к наиболее тяжелому. И при этом надо думать, что, скажем, третья степень тяжести все же не миновала первой, а затем уже второй. И когда надежно диагностируемые состояния могут быть разграничены, исходя из

достаточно полных статистических выборок с применением методов дискриминантного анализа, и представлены в форме канонических дискриминантных или же простых классифицирующих функций, становится возможным ими воспользоваться, чтобы представить динамику конкретных патологических изменений в организме, полагая параметры соответствующих наблюдений распределенными от здорового до тяжелейшего случая на в известном смысле «условной» шкале времени.

В самом деле, в основу аппарата *дискриминантного анализа* положено представление о возможности для i -го объекта k -ой группы объектов выразить отношения в совокупности параметров $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_p$ линейной комбинацией $f_{ik} = u_0 + u_1 \mathbf{X}_{i1k} + u_2 \mathbf{X}_{i2k} + \dots + u_p \mathbf{X}_{ipk}$, которую принято называть *канонической дискриминантной функцией* [9, 7]. В практике управления это служит или целям идентификации, или же выбора режимов управляющего воздействия, когда необходимо бывает установить принадлежность некоторого объекта тому или иному классу объектов. Нередко требуется выяснить, сколь надежны априорные представления о группировании некоторой совокупности объектов управления, сколь велики межгрупповые (межклассовые) различия, и в какой мере каждый параметр из совокупности описывающих объект параметров с достаточной надежностью определяет значимые различия или эффективность идентификации [2, 6].

Коэффициенты u_j находят, зная собственные векторы \mathbf{v}_j из $\min(q - 1, p)$ собственных векторов

$$\mathbf{V} = \mathbf{W}^{-1} \times \mathbf{B}, \text{ где } \mathbf{W} \text{ представлена элементами } w_{mn} = \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^{r_k} (x_{imk} - \bar{x}_{mk})(x_{ink} - \bar{x}_{nk}), \text{ а } \mathbf{B} = \mathbf{T} \times \mathbf{W}, \text{ где}$$

$$t_{mn} = \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^{r_k} (x_{imk} - \bar{x}_{mk})(x_{ink} - \bar{x}_{nk})$$

\mathbf{T} представлена элементами t_{mn} , соответственно:

q – число классов или групп;

r_k – число объектов в k -ом классе;

p – число параметров, описывающих отдельный объект;

$$\bar{x}_{mk} = \sum_{i=1}^{r_k} x_{imk} \quad \text{– среднее значение } m\text{-го параметра } k\text{-го класса;}$$

$$\bar{x}_{nk} = \sum_{i=1}^{r_k} x_{ink} \quad \text{– среднее значение } n\text{-го параметра } k\text{-го класса;}$$

$$\bar{\bar{x}}_m = \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^{r_k} x_{imk} \quad \text{– среднее значение } m\text{-го параметра;}$$

$$\bar{\bar{x}}_n = \sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^{r_k} x_{ink} \quad \text{– среднее значение } n\text{-го параметра.}$$

Соответственно, коэффициенты канонической дискриминантной функции:

$$u_j = v_j \sqrt{(N - q)}, \text{ где } N = \sum_{k=1}^q r_k, \text{ а свободный член } u_0 = - \sum_{j=1}^p u_j \bar{\bar{x}}_j. \quad (1)$$

Собственные векторы \mathbf{v}_d , как и соответствующие им собственные значения λ_d , где d – номер очередного из $\min(q - 1, p)$ собственных векторов (значений), находят в предположении, что сумма квадратов величин, составляющих каждый собственный вектор, равна единице, а дискриминантные переменные x_{ijk} определены в интервальной шкале, линейно независимы и принадлежат многомерному нормальному распределению, причем $q \geq 2$, $r_k \geq 2$, $0 < p < N - 2$.

О доле вклада отдельных переменных в дискриминантную функцию можно судить по величине стандартизованных коэффициентов дискриминантной функции

$$c_j = \frac{v_j \sqrt{t_{jj}}}{\sqrt{\sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^p v_m v_n t_{mn}}} . \quad (2)$$

Имея тот же смысл, что и нестандартизованные коэффициенты u_j , они вычисляются применительно к стандартизованным (с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией) параметрам и тогда оказываются сопоставимыми друг с другом.

Вычисля имеющий распределение χ^2 с p степенями свободы квадрат расстояния Махalanобиса между отдельным классифицируемым объектом и центроидом k -го класса тестирующей выборки, легко найти вероятность $Pr(X | G_k)$ принадлежности объекта к конкретному классу k :

$$D^2_{(X|G_k)} = (N - q) \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^p w_{mn}^{-1} (\bar{x}_{mk} - x_m)(\bar{x}_{nk} - x_n) , \quad (3)$$

где x_m и x_n , соответственно, m -й и n -й параметры классифицируемого объекта. А вероятность того, что объект X является членом k -го из q классов, т.е. апостериорная вероятность

$$Pr(G_k | X) = \frac{Pr(X | G_k)}{\sum_{k=1}^q Pr(X | G_k)} . \quad (4)$$

Относя объекты к тому или иному классу, т.е. при распознавании или диагностике, нередко предпочтительнее воспользоваться простыми классифицирующими функциями:

$$h_k = a_{0k} + a_{1k} \mathbf{X}_1 + a_{2k} \mathbf{X}_2 + \dots + a_{pk} \mathbf{X}_p , \quad (5)$$

где $a_{jk} = (N - q) \sum_{m=1}^p w_{mj}^{-1} \bar{x}_{mk}$, $a_{0k} = -0.5 \sum_{j=1}^p a_{jk} \bar{x}_{jk}$ и считают объект принадлежащим классу

с максимальным значением h .

В частности, полагая, что совокупность q векторов коэффициентов простых классифицирующих функций может быть представлена как «притягивающее множество», то, к примеру, для параметров метаболизма можно было бы выразить

$$\mathbf{h} = \mathbf{Ax} + \mathbf{b} , \quad (6)$$

где \mathbf{x} – параметры метаболизма (данные анализов);

\mathbf{A} и \mathbf{b} – найденные ранее с целью диагностики состояния пациента коэффициенты и свободные члены простых классифицирующих функций (ПКФ);

\mathbf{h} – значение (вектор) ПКФ в конкретном случае в конкретный момент времени.

Диагноз, т.е. отнесение к той или иной степени тяжести наблюданной патологии, определяется как $N(h_{max})$, т.е. номер максимальной величины h_i из \mathbf{h} .

Если в классификации, построенной на основе представлений о тяжести патологии, последовательность номеров от «здоровых» к «наиболее тяжелым», соответствует индексам элементов вектора \mathbf{h} , то следует указать, что в динамике $\mathbf{h}(t)$ на конкретный момент времени мгновенное смещение $\max(h_i)$ возможно только между соседними номерами. Иными словами, невозможен случай мгновенного перехода от здорового состояния, скажем, к II или III степени тяжести и наоборот. Цель исследования при этом определяется как необходимость изыскать условия и пути реализации перевода системы от состояния N_{i+1} к состоянию N_i .

Ранее в целях автоматизации диагностики проявлений гестоза на поздних сроках беременности [8, 4], опираясь на показатели уровня гипоксии и антиперекисной защиты у женщин, удалось найти достаточно эффективные в практическом применении канонические дискриминантные и простые классифицирующие функции (В.А.Уткин и Е.И.Склар Программа консультативной биохимической диагностики гестозов. Сертификат МЗ РФ N 59 от 26.10.92).

Воспользовавшись теми же данными в представлении натянутого на векторы простых классифицирующих функций пространства состояний метаболизма, на каждом из этапов возможной постановки диагноза можно видеть (рис. 1) как еще обратимые нарушения в работе выделительной системы по завершении этапа торpidной формы нефропатии I степени тяжести обретают далее характер необратимых.

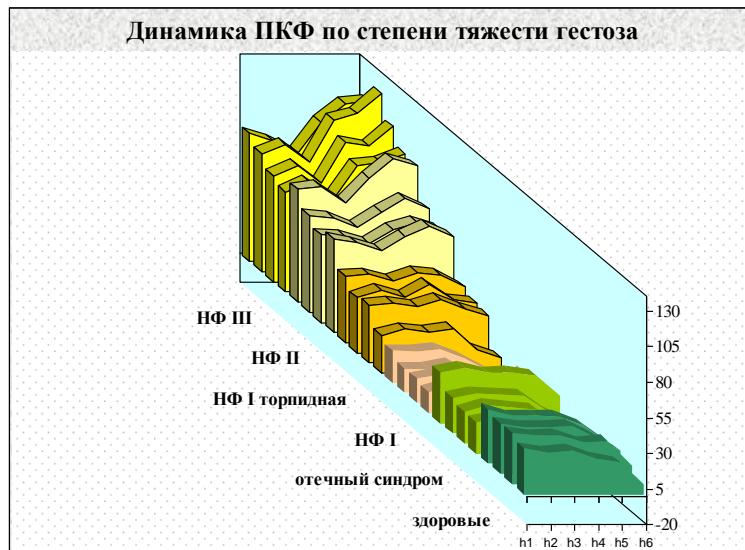


Рисунок 1 – Величины значений простых классифицирующих функций (ПКФ) в распределении по оси «условного» времени динамики развития гестоза

В теории управления хорошо известны методы перевода системы из одного фазового состояния в другое, и в подобных исследованиях аналогом фазового состояния объекта могут служить, в частности, рассмотренные нами выше простые классифицирующие функции. Исследуем теперь возможность определения величин управляющих воздействий, переводящих объект из заданного состояния внутри ранее полученного набора классифицирующих функций в другое по принадлежности внутри того же набора классифицирующих функций состояние.

Чтобы определить роль параметров воздействий, обуславливающих перевод объекта в определенное состояние, рассмотрим этот процесс как переход из одного «фазового» состояния (внутри ранее найденного набора классифицирующих функций) в другое (соответствующее уже иной из того же набора классифицирующих функций) [3].

В общем случае классифицирующие функции записутся следующим образом:

$$y_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} x_j + c_i^*, \quad i = \overline{1, l}, \quad (7)$$

где

l – число состояний объекта,

y_i – значение классифицирующей функции, соответствующей i -му состоянию;

n – число значимых для распознавания параметров;

x_j – значение j -го параметра;

c_{ij} – коэффициент при j -м параметре для i -й классифицирующей функции;

c_i^* – свободное слагаемое для i -й классифицирующей функции.

Коэффициенты классифицирующих функций c_{ij} и c_i^* могут быть вычислены исходя из представлений дискриминантного анализа [1, 7, 9].

Состояние объекта определяется в соответствии с тем, значение какой из классифицирующих функций максимально:

$$y_{i^*} = \max_{i=1,l} y_i$$

состояние $= i^*$, если

Совокупность функций (7) будем рассматривать как наблюдатель объекта, параметры x_j - как внутренние переменные (переменные состояния) объекта, а y_i - как переменные функции выхода объекта.

При изменении параметров состояния значения классифицирующих функций изменятся следующим образом:

$$\frac{\Delta y_i}{\Delta t} = \sum_{j=1}^n c_{ij} \frac{\Delta x_j}{\Delta t}, \quad i = \overline{1, l}$$

$$\Delta y_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} \Delta x_j \quad (8)$$

Значение каждой из классифицирующих функций в данный момент времени будет определяться как сумма значения функции в предшествующий момент и изменения, произошедшего за рассматриваемый промежуток времени.

Теперь предположим, что объект испытывает влияние конечного множества входных воздействий (f_1, f_2, \dots, f_m) .

Влияние входных переменных на каждую из переменных состояния зададим линейными комбинациями значений этих переменных и переменных состояния системы в предшествующий момент времени:

$$\frac{\Delta x_j}{\Delta t} = \sum_{p=1}^n a_{jp} x_p + \sum_{q=1}^m b_{jq} f_q, \quad j = \overline{1, n} \quad (9)$$

Коэффициенты a_{jp} и b_{jq} определим, применяя регрессионный анализ [9] данных эксперимента по установившейся реакции на определенные воздействия и при конкретных значениях переменных состояния в исходный момент времени.

Если необходимо перевести объект в иное «фазовое» состояние (например, в состояние $-l$) нашей целью является определение входных воздействий, соответствующим образом корректирующих значения классифицирующих функций, т.е. таких, чтобы:

$$y_l - y_k > 0, \quad k = \overline{1, l-1} \quad (10)$$

для чего должно выполняться условие:

$$\Delta y_l > y_k - y_l + \Delta y_k, \quad k = \overline{1, l-1} \quad (11)$$

Выразим значения переменных выхода и изменений переменных выхода, через значения переменных состояния, их изменений и через значения входных переменных:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n c_{lj} \left(\sum_{p=1}^n a_{jp} x_p + \sum_{q=1}^m b_{jq} f_q \right) \Delta t &> \sum_{j=1}^n c_{kj} x_j + c_k^* - \sum_{j=1}^n c_{lj} x_j - c_l^* + \\ &+ \sum_{j=1}^n c_{kj} \left(\sum_{p=1}^n a_{jp} x_p + \sum_{q=1}^m b_{jq} f_q \right) \Delta t \\ &\quad , \\ \sum_{j=1}^n c_{lj} \sum_{p=1}^n a_{jp} x_p \Delta t + \sum_{j=1}^n c_{lj} \sum_{q=1}^m b_{jq} f_q \Delta t &> \sum_{j=1}^n c_{kj} x_j + c_k^* - \sum_{j=1}^n c_{lj} x_j - c_l^* + \\ &+ \sum_{j=1}^n c_{kj} \sum_{p=1}^n a_{jp} x_p \Delta t + \sum_{j=1}^n c_{kj} \sum_{q=1}^m b_{jq} f_q \Delta t \\ &\quad , \\ &\quad k = \overline{1, l-1} \end{aligned}$$

Перенесем слагаемые, содержащие переменные входа в левые части неравенств, остальные – в правые части неравенств.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n c_{lj} \sum_{q=1}^m b_{jq} f_q \Delta t - \sum_{j=1}^n c_{kj} \sum_{q=1}^m b_{jq} f_q \Delta t &> \sum_{j=1}^n c_{kj} x_j + c_k^* - \sum_{j=1}^n c_{lj} x_j - c_l^* + \\ + \sum_{j=1}^n c_{kj} \sum_{p=1}^n a_{jp} x_p \Delta t - \sum_{j=1}^n c_{lj} \sum_{p=1}^n a_{jp} x_p \Delta t & , \\ k = 1, l = \overline{l-1} & \end{aligned} \quad (12)$$

Данная система уравнений решаема, если число внешних воздействий $m \leq l-1$, и система имеет единственное решение при $m = l-1$. Если же система не имеет решений, то перевод объекта в заданное состояние невозможен.

Таким образом, становится возможным сформировать траектории адекватного поставленным целям управления объектом, где математические модели линейны относительно входных воздействий.

Не менее интересным представляется развитие такого подхода применительно к т.н. неотложным состояниям, когда внезапно наступившее ухудшение здоровья или травматическое поражение проявляет в условиях интенсивной терапии реконвалесцентную или, напротив, тератогенную динамику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
2. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления // Учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т., 2009. – 136 с.
3. Кухарова Т.В., Папуш Е.Г., Першин И.М., Уткин В.А. Управляющие воздействия для объектов, описываемых дискриминантными или регрессионными функциями // Современная наука и инновации. – №4(16), 2016. – С. 29-33.
4. Уткин В.А. Склляр Е.И. Классификация и диагностика с участием и без участия врача // Материалы XXVI юбилейной научно-практической конференции врачей Курганской области. - Курган, 1993. - С. 28-35.
5. Уткин В.А. Методические аспекты математико-статистического анализа медицинских данных Часть 2. Атрибутивная статистика в медицинских исследованиях // Медицинский вестник Северного Кавказа, 2009; №3(15): С. 70–75.
6. Уткин В.А. Методические аспекты математико-статистического анализа медицинских данных Часть 3. Классификация и диагностика в современной медицине с применением дискриминантного и кластерного анализа // Медицинский вестник Северного Кавказа, 2009; №4(16): С. 62–65.
7. Уткин В. А. Статистические технологии в медицинских исследованиях: Монография, 2-е изд., испр., доп. – Пятигорск: ГНИИК ФМБА РФ 2012. – 212 с.
8. Склляр Е.И. Диагностические критерии перинатального риска при гестозе : автореферат дис. ... кандидата медицинских наук : 14.00.01 / МЗ РСФСР. Омский мед. ин-т им. М. И. Калинина. - Омск, 1990. - 21 с.
9. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ./ Дж-О.Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р.Клекка и др.; Под. ред. И.С.Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.

V. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Вартумян Арушан Арушанович, Клименко Ирина Сергеевна

Северо-Кавказский федеральный университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИЧНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Аннотация. Статья посвящена вопросам синтеза процесса личностно-ориентированного обучения в системе высшего профессионального образования. Выявлена и обоснована необходимость формирования модели специалиста, в основе которой лежат модели содержания, формы и результата образовательного процесса. Показано, что интеграция методов игрового социального имитационного моделирования в образовательный процесс обеспечивают переход от принципа обучения «сиди и слушай» к принципу «думай и делай».

Ключевые слова: личностно-ориентированное обучение, жизненный цикл, модель специалиста, модель формы, содержания и результата обучения, инновационные технологии, игровое социальное имитационное моделирование.

Annotation. The article is devoted to the synthesis of the process of personality-oriented learning in the system of higher professional education. The necessity of forming a model of a specialist based on models of the content, form and result of the educational process is revealed and justified. It is shown that the integration of methods of game social simulation in the educational process provides a transition from the principle of learning to "sit and listen" to the "think and do" principle.

Keywords: personality-oriented training, life cycle, specialist model, model of form, content and result of training, innovative technologies, game social simulation modeling.

Системный подход к процессу синтеза современных образовательных технологий личностно-ориентированного обучения в системе высшего профессионального образования требует определить жизненный цикл подготовки специалиста.

Жизненный цикл процесса подготовки специалистов с высшим профессиональным образованием - это циклически повторяющаяся последовательность действий, которая дает возможность внесения системных изменений в управление процессом по мере выявления проблем и/или повышения требований к уровню подготовки специалиста.

Многолетняя практика работы в ВУЗе и исследования проблемы совершенствования технологий обучения, проводимые в течение ряда лет, позволяют утверждать, что существующая на сегодняшний день система подготовки специалистов лишена признаков личностно-ориентированного обучения. Классическая ВУЗовская подготовка инженерных кадров в основе своей содержит все виды занятий, которые по сути своей являются пассивной формой обучения по схеме «сиди и слушай». В такой системе процесс повышения качества достигается за счет планомерного улучшения отдельных характеристик системы образования (качество преподавания, материальная база, изменение способов и форм контроля знаний и т.п.). В современных публикациях по вопросу внедрения современных образовательных технологий авторами не обнаружено практически значимых методик или рекомендаций, которые позволяют перевести процесс подготовки из формата «сиди и слушай» в формат «думай и делай».

Направление исследования. Предлагается такая система управления процессом подготовки специалистов, которая функционирует по правилам календарно-развивающихся операций, то есть при каждом следующем повторении жизненного цикла формируется более высокий уровень качества, чем на предыдущем. Как это происходит? На рисунке 1 показаны этапы жизненного цикла процесса подготовки специалистов.

Первый этап жизненного цикла представляет собой систему формирования контингента будущих абитуриентов через институт профессиональной ориентации и механизм формирования элитных групп [1]. Данная схема давно и прочно себя зарекомендовала в форме интернатов для одаренных детей, физико-математических школ и т.п. Личностно-ориентированный подход на первом этапе жизненного цикла предполагает внедрение современных технологий в процесс профессиональной ориентации молодежи, что обеспечит на втором этапе формирование студенческого контингента из числа абитуриентов, осознанно выбирающих профессию.

Циклическое повторение первых двух этапов позволяет повысить начальный уровень подготовки будущих специалистов, снизить влияние коммерческой составляющей в процедуре отбора абитуриентов, сформулировать ожидаемые требования к уровню подготовки и степени конкурентоспособности специалистов с высшим профессиональным образованием. На третьем этапе жизненного цикла происходит формирование модели будущего специалиста.

Формирование модели специалиста. Под термином «модель специалиста» предлагается понимать формально и корректно определенные цели и задачи, для решения которых ведется подготовка конкретного студента. Как правило, целью процесса является высокий рейтинг студента; управляющие воздействия осуществляются в процессе контроля знаний (текущих, рубежных, итоговых). Почти бесспорным является тот факт, что при подготовке специалистов с высшим профессиональным образованием оптимальный результат можно получить в том случае, если происходит совпадение возможностей обучаемого, системы его предпочтений с теми целями и задачами, которые перед ним ставят тот или иной преподаватель-предметник.

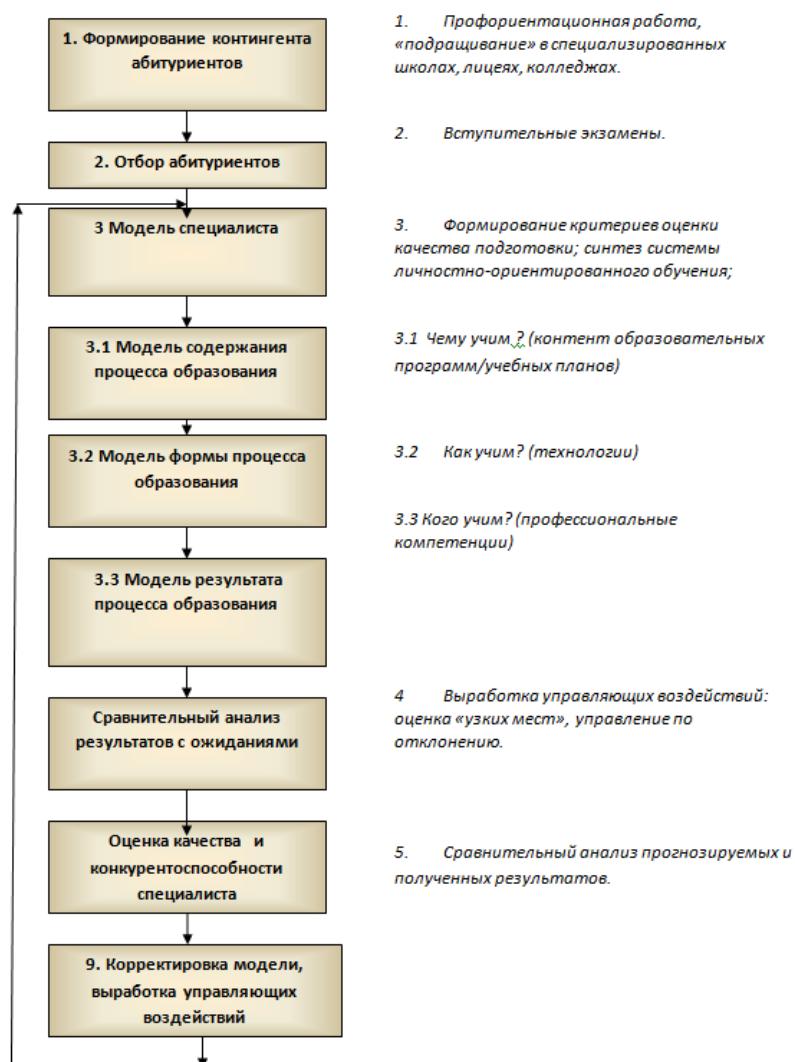


Рисунок 1 - Этапы жизненного цикла процесса подготовки специалистов.

Относительная свобода ВУЗа в формировании учебных планов/программ, возможность предоставлять студентам реальный выбор из блока элективных дисциплин позволяют формировать индивидуальный учебный план каждого студента, повышают значимость этапа формирования модели будущего специалиста, так как именно на этом этапе происходит самоопределение студента в целях, позиции и ситуации.

Модель специалиста должна отвечать на три ключевых вопроса: кого учим?, чему учим?, как учим?. Определим три уровня профессиональных компетенций в зависимости от типа, класса и степени сложности задач, которые ему (специалисту) предстоит решать в своей профессиональной сфере:

–специалист, способный решать задачи на исполнительском уровне, выполнять работу в соответствии с инструкцией по определенному, заранее известному алгоритму; очевидно, что такой вид деятельности не предполагает свободы выбора, от исполнителя требуется высокая степень организованности, не требуется проявления личной инициативы в решении проблемных ситуаций;

–специалист, способный решать организационно-технологические задачи, то есть предполагается профессиональная деятельность в рамках предметной области с элементами организационного управления; способность принимать решения в условиях частичной неопределенности;

–специалист, способный решать задачи аналитико-исследовательского характера, то есть предполагается наличие у специалиста навыков и умений принятия решений в условиях полной неопределенности, хорошее знание предметной области, аналитическое мышление, способность к исследовательской работе, личная инициатива.

Как это работает? При подготовке магистров/специалистов/бакалавров в области информационных систем и/или вычислительной техники и программного обеспечения процесс формирования модели специалиста полностью определяется *порядком изучения* базовых и профессиональных дисциплин. При освоении фундаментальных дисциплин и дисциплин, связанных с изучением технологии и языков программирования, очевидно, что в основу модели специалиста должна быть положена модель, в которой реализован исполнительский уровень.

Это объясняется тем, что с одной стороны, подготовка профессионала в области информационных технологий требует определенной дисциплины мышления, навыков работы по заданному алгоритму, четкого знания стандартных приемов и алгоритмов решения задач. С другой стороны, эти качества, сформированные в начале процесса обучения, в дальнейшем помогут будущему специалисту перейти на второй и третий уровень сложности решения профессиональных задач; то есть перейти от навыков работы по заданному алгоритму к разработке оригинальных алгоритмов управления сложными системами.

При изучении блока профессиональных дисциплин у студентов второго – третьего курсов формируются знания, умения и навыки по дисциплинам, связанным с изучением методов математического и имитационного моделирования, администрирования, то есть профессиональные компетенции, обеспечивающие способность решать задачи организационно-технологического характера и принимать самостоятельные решения.

Способности к аналитико-исследовательской работе выявляются и развиваются при прохождении производственных практик, выполнении курсовых работ/проектов, участии в научных исследованиях кафедры, выполнении дипломных работ/проектов с элементами исследований.

Результат обучения в ВУЗе имеет многоаспектный характер, так как он интересен

–ВУЗу, который оценивает качество подготовки, как степень соответствия стандарту и нормам;

–студенту, который оценивает степень удовлетворения своих ожиданий и потребностей;

–работодателю, который оценивает способность молодого специалиста выполнять поставленные задачи.

Вторая составляющая модели специалиста – это содержание образовательных программ. Вопрос «Чему учим?» не случаен, типовой учебный план специальности, содержание которого

определенено государственным обязательным стандартом образования нормирует контентную часть образовательного процесса лишь на 65-70%, остальные 30-35% носят название «элективные дисциплины». ВУЗ самостоятельно определяет их содержание в зависимости от своих возможностей (кадры, материальная база и т.п.), системы предпочтений, и конъюнктуры рынка в своем регионе. Именно поэтому, определение содержания процесса образования, то есть поиски ответа на вопрос «Чему учим?» на данном этапе являются ключевыми.

Предлагаемый подход позволит реализовать личностно-ориентированный аспект обучения: определив состав и структуру профессиональных компетенций специалиста («Кого учим?»), построим модель содержания образовательного процесса («Чему учим?»), что позволит разработать различные траектории образовательного процесса в рамках одного учебного плана специальности.

Так, традиционная система подготовки специалистов в университетах была ориентирована на формирование у выпускника ВУЗа прочной фундаментальной подготовки, развитие у него способностей к самообразованию и повышению профессионального мастерства, то есть миссия ВУЗов заключалась в формировании интеллектуальной элиты общества. Но времена меняются, и сегодня мы должны признать, что подготовка специалистов с высшим профессиональным образованием в современных условиях представляет собой сложный процесс, ориентированный не только на выполнение государственного заказа, но и на удовлетворение требований, которые предъявляют хозяйствующие субъекты к выпускникам ВУЗов.

Позиционирование образования, как услуги изменило миссию ВУЗов: ВУЗы становятся источником ресурса для рынка труда и, соответственно, требования к качеству подготовки специалистов ориентированы на потребности работодателя, который хочет получить в одном лице профессионала в конкретной предметной области, квалифицированного управленца, обладающего определенными знаниями в области психологии и кадрового менеджмента, способного к аналитической работе.

Такая ситуация требует системной работы по мониторингу требований и корректировке соответствующих образовательных программ с целью формирования компетенций, актуальных на данный момент времени.

В связи с этим перед нами встает проблема: как сформировать профессионала, обладающего высоким уровнем подготовки в предметной области, при этом готового к работе с коллективом в условиях рыночной экономики?

Авторами в течение ряда лет ведется целенаправленная работа по разработке и внедрению инновационных технологий, инвариантных по отношению к предметной области и уровню подготовки, как в практику преподавания, так и в процесс оценивания результата образовательной деятельности[2]. Говоря об инновациях в науке, управлении и образовании, все многообразие проблемных ситуаций агрегируем в группы задач, которые отличаются областью применения, назначением и требуют решения. Предлагается различать пять видов задач: учебные, производственные, исследовательские, технические, экономические, управленческие.

Учебная задача, независимо от того, в какой предметной области предполагается работать выпускнику ВУЗа, состоит в формировании знаний, умений/навыков и профессиональных компетенций. Системное применение инновационных технологий при решении перечисленных задач позволяет повысить качество подготовки специалиста, при этом данное утверждение справедливо не только для вузовского образования, но для системы образования вообще (школа, колледж, повышение квалификации), что неоднократно подтверждено практикой.

При решении исследовательских задач инновационные технологии применяются с различными целями:

- формирование банка данных о поведении системы;
- определение возможных вариантов изменения структуры и состава системы;
- анализ эффективности управления сложными системами.

Введение инноваций в методологию исследования позволяет провести моделирование сложной системы, изучить ее особенности и свойства, провести с этой системой необходимые эксперименты и т.п. При этом форма игрового социального имитационного моделирования дает

возможность проведения этих действий в короткие сроки с привлечением такого контингента участников, который обеспечивает адекватность модели и проблемной ситуации. По результатам моделирования происходит переопределение структуры исследуемой системы, оптимизируется стратегия ее жизнедеятельности и т.д.

Производственные задачи решают проблемы оптимизации распределения ресурсов, выбор оптимального маршрута, загрузки и замены оборудования и т.д. Применение инновационных методов типа организационных игр и/или игрового проектирования для решения задач такого класса позволяет определить оптимальную стратегию производственного планирования.

Для инновационных технологий характерным является то, что разделение задач на классы по назначению не лишает эти методы главного достоинства: инвариантности по отношению к предметной области. Так, игра, используемая в качестве учебной, может быть адаптирована на решение реальных производственных задач, а при проведении серии однотипных игр в учебном процессе или на производстве накопленный материал может использоваться в исследовательских целях. Перечисленные выше игровые методы применяются для решения задач экономического, технического, управляемого характера.

Системное использование игровых методов для решения экономических задач, ориентированных на отыскание экстремума функции полезности, позволяет: а) корректно формулировать критерий эффективности функционирования исследуемой системы; выбрать метод оптимизации, адекватный условиям; б) оценить предполагаемый результат; провести вариантный анализ полученного оптимального решения; в) вводя фактор случайного возмущающего воздействия, «проиграть» дополнительные варианты; определить набор оптимальных стратегий поведения в условиях неопределенности и установить ранг каждой стратегии.

Технические задачи решают вопросы разработки, проектирования и создания сложных технических систем. Решение задач этого класса предполагает комплексное применение формальных и неформальных методов. Решение технической задачи должно начинаться с использования игровых методов, так как именно игровые методы позволяют формировать концепцию функционирования проектируемой системы уже на этапе осмысливания проблемной ситуации. Неигровые методы, такие как метод мозговой атаки, метод синектики применяются для определения методов/способов решения проблемы или задачи. Собственно решение задачи проводится с использованием формального моделирования, методов классической оптимизации и методов исследования операций. Анализ результата, определение его соответствия целям, поставленным в начале, проводится с помощью игровых методов.

Управляемые задачи. Оптимизация управления сложными системами с помощью игровых методов позволяет учесть объективные условия проведения операции, случайные воздействия на исследуемую систему и их последствия, поведенческий аспект участников операции. Применение игровых методов при решении задач оптимизации управления позволяет:

- определить ценностные ориентации участников игры; сформировать работоспособный коллектив, ориентированный на решение реальных задач;
- провести проблематизацию в условиях имеющихся реалий; выявить проблему и сформулировать цель, как способ устранения проблемы;
- определить альтернативные пути достижения цели; разработать механизм сравнения предлагаемых альтернатив;
- выполнить сравнительный анализ полученных результатов.

Тщательное изучение и распространение инновационных технологий позволяет повысить эффективность управления сложной системой, в том числе образовательным и воспитательным процессом ВУЗа, поднять качество образования.

Именно эта идея реализуется при определении формы образовательного процесса. Изменение миссии ВУЗа, повышение требований к его выпускникам требует введения инноваций в процесс обучения, в образовательные технологии. При этом под инновациями предлагается понимать изменение методологических основ обучения, а не техническое усовершенствование процесса подготовки специалиста. К сожалению, нередко информатизация процесса образования, использование в практике преподавания вычислительной техники, интерактивных устройств

интерпретируется как инноватика. Более того, излишнее увлечение преподавателя «цифровыми технологиями», ничего, кроме вреда, дать обучаемому не могут; общение студента с профессионалами, мастер-классы профессоров, лекции на высоком уровне ораторского искусства и профессионального мастерства - вот основа профессиональных компетенций.

Авторы предлагают под термином «инновационные образовательные технологии» понимать методы игрового социального имитационного моделирования, такие как CASE-технологии, анализ конкретной ситуации (АКС); имитационное упражнение (ИУ); тренинг; разыгрывание ролей (РР); деловая игра (ДИ); игровое проектирование (ИП); метод активного социологического тестированного анализа и контроля («МАСТАК») [3].

Перечисленные выше методы имеют различные цели, правила принятия решения и оценки результатов, но в тоже время для них характерна общая информационно-логическая структура, они отличаются от традиционных, классических форм обучения, обладают по сравнению с ними рядом преимуществ:

- использование моделирования, как методологической основы инновационных образовательных технологий;
- инвариантность по отношению к предметной области;
- повышенная мотивация и, как следствие, активность обучаемых в течение всего занятия;
- постоянное взаимодействие преподавателя и обучаемых с помощью обратной связи;
- комплексное обучение, как конкретному предмету, так и приемам коллективной мыследеятельности, принятия решений и т.д.;
- возможность применения методики для решения задач, имеющих различную целевую направленность и степень сложности.

Каждый из перечисленных методов имеет ряд особенностей и специфику применения в зависимости от типа решаемой задачи: используем ли мы их в процессе преподавания, или при оценивании результата обучения.

Модель формы образовательного процесса, синтезированная на данном этапе, дает возможность построить график профессиональной компетентности: по оси ординат - уровень знаний; по оси абсцисс – изученные предметы, то есть определяется траектория движения обучаемого: содержание и форма обучения.

В целом, модель специалиста, как показано выше базируется на «трех китах»: модели содержания, формы и результата образовательного процесса. После того, как определены цели и задачи образования с позиций будущей профессиональной деятельности и конкретной предметной области, выполняется переход к формированию системы образовательных траекторий, определяется содержание образовательной программы и формы/ методы ее реализации. Инновационные технологии, вводимые в структуру курса, меняют форму подачи материала, учебный процесс, в основе которого лежит новая методология, обеспечивает переход от концепции обучения «сиди и слушай» к концепции «думай и делай».

Результаты.

1. При проведении исследований по инновациям в образовании была поставлена задача: определить степень влияния различных факторов на качество подготовки специалистов. Респонденты из числа студентов, магистрантов, ППС и представителей работодателей, общим числом 113, были объединены в группы, соответственно первая, вторая, третья и четвертая. С каждой группой, используя известные прототипы [4] проводились имитационные упражнения, цель которых определить ранг того или иного фактора, его влияние на качество подготовки специалистов. Были выделены такие факторы как квалификация ППС, материально-техническая база ВУЗа, обеспеченность литературой, формы и виды контроля знаний, производственные практики т.п. В ходе экспериментов было установлено, что третья группа экспертов (ППС вуза) и четвертая группа (производственники) считают квалификационный уровень ППС основным фактором, обеспечивающим качество подготовки специалистов, тогда как магистранты (вторая группа), принимавшие участие в исследованиях, не считают этот фактор особо весомым. (Рисунок 2).

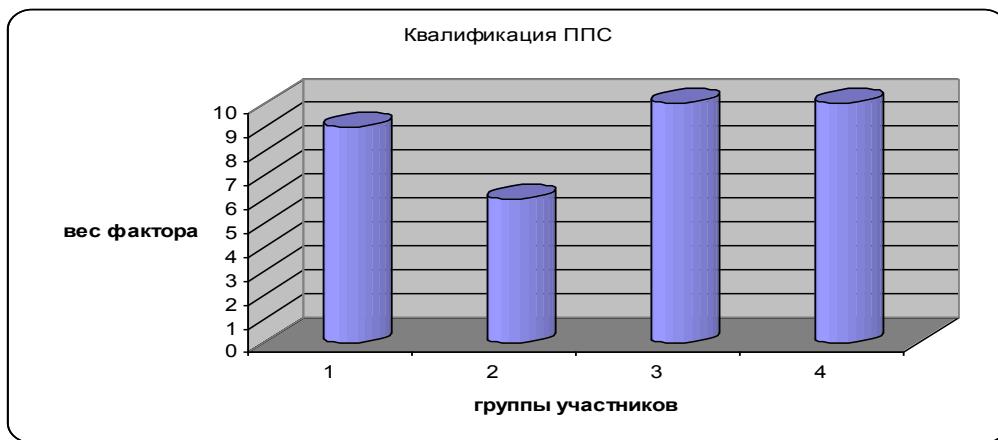


Рисунок 2 – Оценка значимости квалификации ППС различными категориями участников.

Студенты на первое место по значимости ставят материально-техническую базу (Рисунок 3), на втором месте по значимости студенты ставят квалификацию ППС.



Рисунок 3 – Оценка веса фактора «материально-техническая база».

Анализ влияния обеспеченности учебно-методической литературой на качество подготовки специалистов показал, что этот фактор имеет наибольший вес, по мнению преподавателей, производственники не считают этот фактор важным (Рисунок 4).

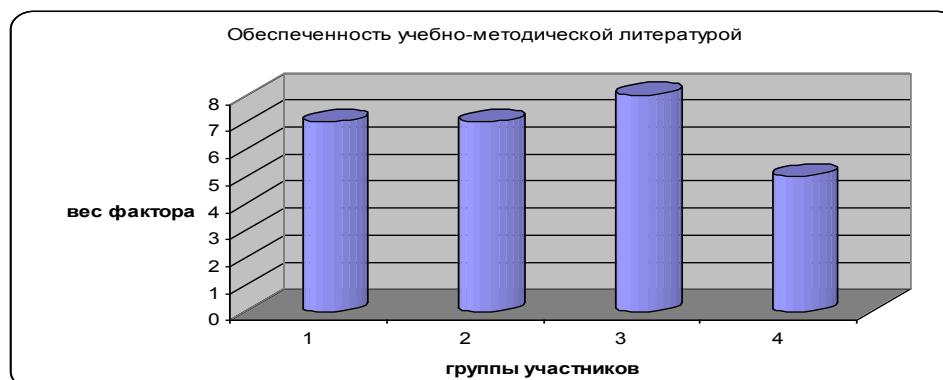


Рисунок 4 - Оценка значимости фактора «обеспеченность учебно-методической литературой».

Удалось установить, что ППС ВУЗа не придает особого значения влиянию практик на качество подготовки, тогда как производственники и магистранты считают этот фактор достаточно весомым (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Оценка веса фактора «организация и проведение производственных практик».

В ходе исследования проведен анализ оценки факторов по категориям участников. Из диаграммы, представленной на рисунке 6 видно, что студенты на первое место по значимости ставят материально-техническую базу, на втором месте квалификация ППС, самый незначимый фактор, по мнению студентов, наличие условий для самостоятельной работы.

Аналогичные диаграммы были построены по всем категориям участников; из рисунков 7- 9 видно, что магистранты на первое место ставят формы контроля знаний, преподаватели и производственники – квалификацию ППС.

Интересным с точки зрения проводимого исследования является тот факт, что условия для самостоятельной работы оцениваются как малозначительный фактор, влияющий на качество подготовки специалистов: вес составляет 3 и 4 у студентов и производственников соответственно.



Рисунок 6 – Оценка значимости факторов студентами.

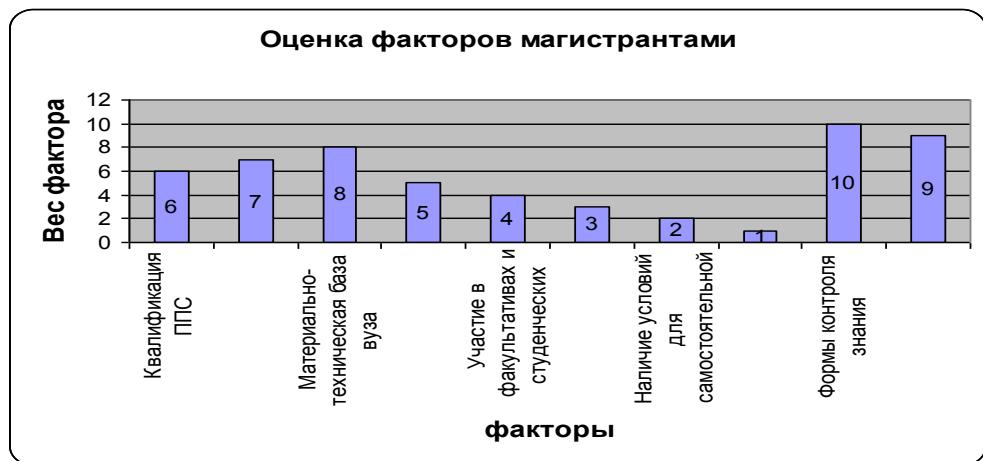


Рисунок 7 – Оценка значимости факторов магистрантами



Рисунок 8 – Оценка значимости факторов преподавателями



Рисунок 9 – Оценка значимости фактора производственниками.

2. Собственно оценка эффективности инновационных технологий была получена в ходе проведения исследования и сравнительного анализа результативности различных методологических подходов к обучению: традиционного и инновационного. В ходе эксперимента были сформированы две рабочие группы по 23-25 человек в каждой группе. Одна группа проходила обучение в традиционной форме, другая группа проходила обучение по технологии игрового социального имитационного моделирования.

В процессе проведения семинаров проверялись знания участниками политики и процедур, целей и задач системы менеджмента качества (СМК). Как проходили семинары? Участники были объединены в игровые группы по 4-5 человек, каждой игровой группе выдавался пакет, в котором было десять вопросов разной степени сложности, суммарная цена вопросов в пакете пятьдесят баллов. Элемент соревнования, привнесенный в семинар и естественное желание участников набрать максимальное количество баллов повышали результативность процесса обучения.

Проведенные исследования и сравнительный анализ эффективности традиционной методики обучения и методики, построенной на инновационных технологиях, показан на диаграмме (Рисунок 10).

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов обучения

Методика обучения	Количество участников набравших более 75 баллов									
	Номер занятия									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Традиционная	7	7	6	8	9	8	11	12	10	9
Иновационная	12	14	16	15	17	21	22	21	23	25

Цикл из десяти занятий показал, что применение инновационных методик дает устойчивый рост числа участников, набирающих большое количество баллов.

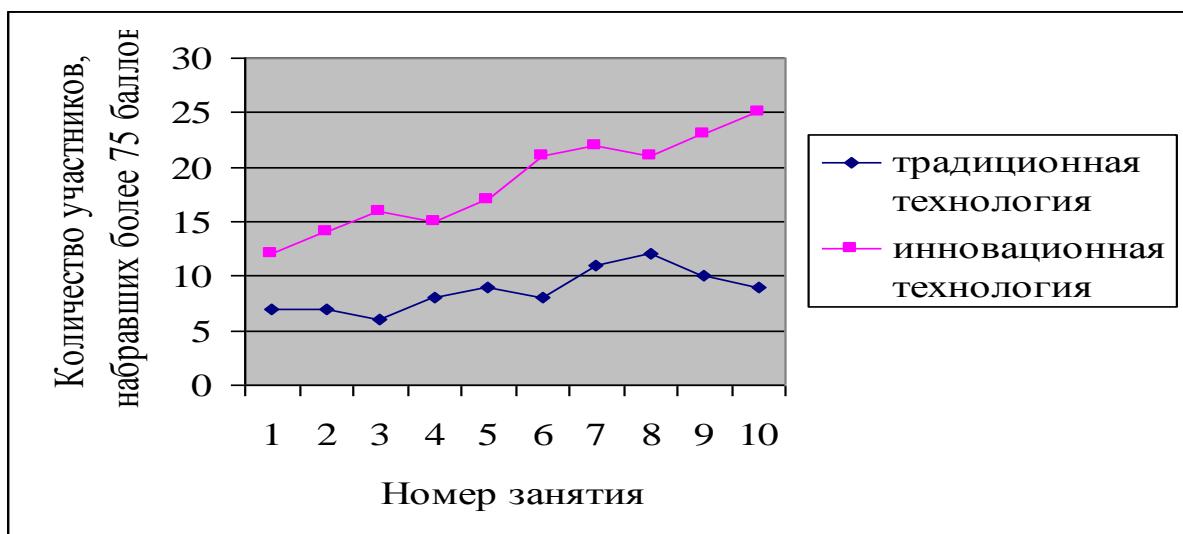


Рисунок 10 – Сравнительный анализ результатов обучения.

Иновационные технологии сегодня – это инструмент исследования, имитационный эксперимент, по сути, новая область деятельности, способ решения задач, стоящих перед системой высшего образования.

Практическое применение. С чего начинается подготовка к проведению игрового занятия? В настоящее время единой теории разработки и проведения игровых занятий нет. Разработка идеи, конструирование игры и ее внедрение во многом определяется квалификацией, опытом, талантом и интуицией автора (разработчика) игры. Игра – это уникальный инструмент обучения и только отточенное, доведенное до совершенства, мастерство владения этим инструментом, позволяет получить результат. Хорошая игра увлекает обучаемых, и процесс обучения проходит интереснее, эффективнее.

Именно поэтому так важен первый этап игры: замысел и определение цели игры. Другими словами, зная и понимая структуру того игрового метода, который предполагается использовать, необходимо четко представлять, зачем проводится игра? Игра - знакомство с группой и введение в проблему, игра - как процедура проблематизации, игра – обучение приемам рационального проектирования, игра – поиск оптимального решения проблемы, игра – обучение навыкам публичного выступления, игра – определение лидера группы и его «окраски» и т. п. – этот неполный перечень целей, которые может ставить перед собой игрохроник дают представление о многообразии возможностей игрового социального имитационного моделирования.

После осмыслиения цели необходимо представить сценарий игры. Как правило, описания игр, встречающиеся в литературе, дают укрупненное описание структуры игры под названием «ход

игры и состав участников», но этого недостаточно. Сценарий необходимо продумать, составить подробный план с учетом возникающих пауз, непредусмотренных заминок и пр. Лучше сценарий расписать, с тем, чтобы после игры сравнить затраты времени фактические и плановые, оценить динамику игры, ее темп, заинтересованность участников и т.п.

Последовательность проведения игры определяется во многом ее целями и задачами, то есть носит индивидуальный характер, но каждая игра предполагает наличие таких этапов, как объявление темы; формирование игровых групп и распределение ролей, как между группами, так и внутри групп; выполнение задания, то есть групповая работа; обсуждение результатов игры. Последний этап – после игровой анализ – не менее важен, чем определение целей и задач, так как при проведении этого анализа выявляются и награждаются победители игры;дается общая оценка работы каждой игровой группы и всех участников с точки зрения поставленных целей.

Такая палитра технологий, применяемая авторами в течение ряда лет, обеспечивает внедрение инноваций в практику преподавания и позволяет заложить основы личностно-ориентированного обучения.

В то же время, многолетний опыт позволяет утверждать, что игровые методы внедряются в ВУЗовскую практику неспешно, так как они требуют затрат времени на подготовку занятия, немалых сил и энергии при проведении занятия, а главное, в системе вузовского планирования не предусмотрено стимулов для внедрения в практику инноваций. И это тоже проблема, которую необходимо решать, так как наше будущее определяется сегодня, и зависит от того, кого, чему и как мы учим.

Тщательное изучение и распространение инновационных образовательных технологий позволяет повысить эффективность управления образовательным и воспитательным процессом, поднять качество образования.

Выводы

Наши исследования показывают, что в условиях конкуренции на рынке труда требуется сместить акценты в подготовке выпускников ВУЗов и в поствузовском образовании, перейти от подготовки кадров с «узкой» профессиональной специализацией к подготовке специалистов с гибким системным мышлением, высоким уровнем технической и общей культуры.

Такая постановка задачи требует внести существенные изменения в содержание и форму подготовки специалистов, сформировать новую личностно-ориентированную модель обучения, тем самым удовлетворить потребности конкретного студента, выполнить социальный заказ на подготовку специалистов и обеспечить развивающее образование, то есть всестороннее развитие творческих способностей обучаемых для подготовки людей к жизни в различных социальных средах.

Целенаправленная работа по разработке и внедрению инновационных технологий, инвариантных по отношению к предметной области и уровню подготовки, опыт применения авторских программ показывает [5], что такой подход к использованию инновационных технологий позволяет менять структуру процесса обучения и оперативно получать количественную оценку результатов этого процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вартумян А.А. Интегрированное интерактивное обучение как фактор повседневности в вузе.// Опыт и проблемы модернизации: материалы VII Всероссийского социально-педагогического конгресса «Современное социальное образование – М., 2007.

2. Клименко И.С. Алгоритмы и модели проблемно-ориентированного управления сложными социально-экономическими системами.// Математические методы и модели в исследовании государственных и корпоративных финансов и финансовых рынков: материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции - Уфа: Изд-во БГУ, 2015.- С. 11-15.

4. Клименко И.С. Управление качеством подготовки специалистов: теория и практика: монография. — Костанай: Костанайполиграфия,2010- 252с.

5. Клименко И.С. От технологии 2С к технологии 2Д: монография. — Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. – 284 с.

5. Клименко И.С., Клименко П.Ф. Технология конструирования и области применения новых образовательных технологий// Новые образовательные технологии: материалы международной научно-практической конференции - Екатеринбург: Изд-во УПИ,2014. С. 713-721.

Горбатюк Владимир Феофанович

Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)»

ОБУЧЕНИЕ СИСТЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Аннотация. В настоящей работе приведены результаты исследований автором предложенной им модели обучения, основанной на принципах синергетики. Кратко рассмотрены некоторые системы естественного интеллекта. До сих пор обнаруживаются новые, неизвестные ранее свойства носителей естественного интеллекта: коллективная память у бактерий и коллективное поведение. Обобщая, приходим к выводу, что интеллектом обладает всё живое на нашей планете Земля (естественный интеллект). Структура мозга и центральной нервной системы у всех без исключения носителей естественного интеллекта похожа – усложняясь от насекомых к млекопитающим. Формы обучения, самообучения и взаимного обучения систем естественного интеллекта – общие. Автором создана предположительная модель любого процесса обучения. Предложенная автором модель обучения позволила ему у студентов учебной группы активизировать и использовать присущие всей материи свойства самоорганизации, самоуправления и самообучения, создать эффективные модели системы подготовки будущих педагогов к профессиональной деятельности в условиях внедрения технологий e-learning. Автором предложена концепция динамической модели обучения группы и инструменты диагностики эмерджентных свойств: появления самоорганизации-самообучения и взаимного обучения.

Ключевые слова: модель обучения, естественный интеллект, самоорганизация, динамическая модель обучения, эволюция.

Annotation. In this paper, the author presents the results of his research on the model of education proposed by him, based on the principles of synergetics. Some systems of natural intelligence are briefly considered. Until now, new, unknown properties of carriers of natural intelligence have been discovered: the collective memory of bacteria and collective behavior. Summarizing, we come to the conclusion that all life on our planet Earth (natural intelligence) possesses the intellect. The structure of the brain and central nervous system in all carriers of natural intelligence, without exception, is similar - becoming more complicated from insects to mammals. Forms of learning, self-learning and mutual learning of natural intelligence systems are common. The author created a tentative model of any learning process. The model of training offered by the author allowed him to activate and use the inherent properties of self-organization, self-management and self-education among the students of the training group, to create effective models for the system of training future teachers for professional work in the context of the introduction of e-learning technologies. The author proposes the concept of the dynamic model of group learning and tools for diagnosing emergent properties: the emergence of self-organization, self-learning and mutual learning.

Keywords: model of learning, natural intelligence, self-organization, dynamic learning model, evolution.

Год за годом успешно продолжается обучение студентов по авторской модели, хотя приходится постоянно «додумывать» и совершенствовать модель обучения. Результативность обучения высокая. Практически все студенты успешно осваивают изучаемые по авторской модели курсы (которых у автора более десяти), выполняют задания, стремятся заработать бонусы. Число лидеров в учебных группах по сравнению с прошлым учебным годом растёт. Время выполнения заданий по предметам с каждым годом уменьшается.

Вначале коротко о некоторых системах естественного интеллекта. К настоящему времени накопился громадный материал по частной физиологии высшей нервной деятельности животных и человека. Собрано очень много, правда пока разрозненных, фактов изучения условных рефлексов у животных разных классов, отрядов и видов. В связи с этим встал вопрос и об использовании фактов,

накопленных экспериментальной психологией, освобождённых от антропоморфических толкований. Наконец, имеется уже немалое число случаев разнообразнейшего прикладного использования условных рефлексов в практике медицины, педагогики, сельского хозяйства и т.д. Но вопросы остаются...

В процессе тысяче вековой эволюции мира животных развивалась их способность гибко адаптировать своё поведение к условиям окружающей среды. Эта способность достигла высочайшего совершенства в функциях нервной системы, особенно с развитием исключительно ценных для выживания свойств: фиксации следов пережитых событий. Такая *память*, в широком смысле этого слова, позволяла каждой особи действовать, исходя из собственного жизненного опыта, показывала связь событий в окружающем мире, а при формировании мозга человека явилась основой механизмов его мыслительной деятельности.

В Природе нас окружает множество живых организмов, наделённых более или менее мощным интеллектом. Мощность интеллекта определяется не только количеством нейронов в мозге его обладателей, но и особенностями группового поведения и обучаемости. В группе носителей интеллекта практически всегда выделяются лидеры, которые существенно влияют или даже определяют поведение всей группы. Что интересно, в группе людей тоже наблюдаются аналогичные системные явления [5].

Из-за ограниченного объёма статьи упомянуты только наиболее яркие представители животного мира: насекомые (пчёлы и муравьи), рыбы (дельфины) и млекопитающие (кошки). Особенности поведения, самоорганизации, обучения, самообучения и взаимного обучения и групповое поведение насекомых поражает исследователей своей организованностью. На основе исследования поведения насекомых созданы известные модели искусственного интеллекта.

Пчёлы – высокоорганизованные насекомые. Рой пчёл – это настоящий сверхорганизм, обладающий мощным интеллектом. Изучение особенностей организации (а точнее – самоорганизации), а также изучение интеллекта этого сверхорганизма находится на самом начальном этапе. В частности, общественные пчёлы совместно осуществляют поиск пищи, воды, жилья при необходимости, совместно защищаются от врагов. В улье пчёлы совместно строят соты, ухаживают за потомством, маткой. Оказалось, что танцы, которые исполняют пчёлы-разведчицы, это способ передачи информации о том, в каком направлении и как далеко находится пища. Учёные открыли у пчёл сложную систему сигналов опасности. Ранее наличие подобных сигналов было зафиксировано только у млекопитающих и птиц. До сих пор до конца не исследована система ориентации пчёл в пространстве, использующая зрительные ориентиры, поляризованный свет и магнитное поле Земли [5].

Головной мозг муравья – один из самых крупных в мире животных, однако представление о незаурядном уме этих существ сильно преувеличено. На самом деле муравьи не обладают высоким интеллектом, поскольку все их реакции носят исключительно врожденный характер. Но сложность и многообразие этих инстинктов не имеют аналогов в природе и действительно поражают воображение. Несмотря на то, что число нейронов в мозге муравья представляет лишь крошечную долю тех нейронов, которые содержатся в мозге человека, колония муравьёв – это настоящий сверхорганизм. Муравьи из всех высоко социальных видов обладают развитым символическим языком, причем языком более сложным, чем язык танцев медоносной пчелы; при этом они способны улавливать закономерности и использовать их для увеличения скорости передачи информации.

Судя по всему, муравьи обладают фотографической памятью, которая помогает им ориентироваться в пространстве. Они как бы делают снимки бросающихся в глаза объектов окружающей местности. Глаз человека не может воспринимать поляризованный свет, глаз муравья на это способен, как, впрочем, и глаза пчёл, ос и ракообразных. Учёные до сих пор не понимают, как крошечный мозг муравья может хранить столько информации. Многие животные могут обучаться с помощью подражания, но муравьи, возможно, единственная группа, помимо млекопитающих, у которых наблюдается интерактивное обучение [5].

Нервная система рыб гораздо примитивнее нервной системы высших позвоночных и состоит из центральной и связанной с ней периферической и вегетативной (симпатической) нервной системой. **ЦНС рыбы** включает в себя головной и спинной мозг. Хотя дельфины и принадлежат к классу Млекопитающих, их рассматривают наряду с рыбами как морских обитателей. Размер мозга дельфинов в соотношении с размером их тела гораздо больше, чем у шимпанзе, а их поведение указывает на высокую степень умственного развития. Мозг взрослого дельфина весит около 1700 граммов, а у человека – в среднем 1400. У дельфина в два раза больше извилин в коре головного мозга, чем у человека. По последним научным данным когнитивной этологии и зоопсихологии, дельфины не только имеют «словарный запас» до 14 000 звуковых сигналов, который позволяет им общаться между собой, но и самосознание, «социальное сознание» (*social cognition*) и эмоциональное сознание, готовность помочь новорожденным и больным, путем выталкивания их на поверхность воды. В речи дельфинов учёные уже насчитали 186 разных «свистов». У них примерно столько же уровней организации звуков, сколько и у человека: шесть, то есть звук, слог, слово, фраза, абзац, контекст, есть свои диалекты [5].

Нервная ткань млекопитающих, как и у других позвоночных, эктодермального происхождения и состоит из нервных клеток (нейронов) и вспомогательных клеток – нейроглии. Нейроны образуют многочисленные контакты (синапсы) друг с другом и осуществляют генерирование и распространение нервных импульсов; таким образом, нейрон – структурная и функциональная единица нервной системы. Саму же нервную ткань подразделяют на *серое вещество*, образованное телами нейронов и немиелинизированными нервными волокнами, и *белое вещество*, образованное миелинизированными нервными волокнами. Нервный импульс распространяется по нервным волокнам и передаётся от нейрона к нейрону посредством особого рода межклеточных контактов – синапсов. Почти у всех млекопитающих синаптическая передача осуществляется с помощью химических соединений самой разной природы – нейромедиаторов, а не электрических сигналов.

Строение гортани у млекопитающих усложнено: для неё характерно наличие *щитовидного хряща* и *надгортанника*, не свойственных другим позвоночным, а также *голосовых связок* – парных складок слизистой оболочки, вибрация которых позволяет издавать различные звуки.

Характерный для млекопитающих высокий уровень развития высшей нервной деятельности обуславливает сложные формы их поведения. Во-первых, большую по сравнению с другими позвоночными сложность и подвижность у млекопитающих обретает инстинктивная деятельность, механизмы которой основаны на простых безусловных рефлексах и их сложных сочетаниях (инстинктах). Во-вторых, млекопитающие, особенно высшие плацентарные с присущей им высокой степенью развития коры полушарий переднего мозга, отличаются выраженной способностью к тонкому анализу и восприятию внешних воздействий, к предвидению хода событий, к выработке условных рефлексов и накоплению индивидуального опыта.

Среди всех групп позвоночных млекопитающие выделяются наивысшим уровнем развития интеллекта, что связано прежде всего с прогрессивным развитием коры полушарий переднего мозга, хотя этот уровень существенно различается у млекопитающих разных систематических групп. Одним из показателей умственного развития, хорошо применимым к млекопитающим, является *коэффициент энцефализации* (отношение возведённого в квадрат веса мозга к весу всего тела). По этому показателю лидирующее место занимает человек, а второе – дельфины, у которых значение данного показателя примерно в два раза меньше. Учёные, изучавшие язык млекопитающих, выявили наличие в нём, как и в человеческом языке, плана выражения и плана содержания [5].

Мозг кошки биологически ближе к человеческому, чем мозг собаки. За эмоции у кошек отвечают те же самые участки мозга, что и у людей. По мнению многих зоологов, среди млекопитающих органы чувств наиболее развиты у кошек. Хотя слух у них развит хуже, чем, например, у мышей, превосходные (по человеческим меркам) зрение, обоняние и слух в сочетании с тактильными и вкусовыми рецепторами делают кошек очень чувствительными животными. Кошка имеет выраженную склонность к приобретению условных рефлексов и хорошо поддаётся отдельным видам дрессуры. Было доказано, что кошки обучаются методом проб и ошибок,

посредством наблюдения и имитации. Кошки сохраняют информацию более длительное время, чем собаки. В течение одного эксперимента было обнаружено, что кошки обладают зрительной памятью, сравнимой со зрительной памятью обезьян. В другом эксперименте по определению способностей краткосрочной рабочей памяти собаки показали лучшее время (на 60 с), чем кошки. Кошки, перед которыми ставили поочерёдно простые и сложные задачи, быстрее решали сложные, чем кошки, перед которыми ставили только сложные задачи. Мозг кошки – наилучший механизм, управляющий телом быстро и слаженно, позволяющий животному показывать себя не только со стороны домашнего любимца, но и как опасного хищника. Учёные университета Мичигана неожиданно обнаружили, что мозг кошки может распознать лицо быстрее и детальнее, чем любой из существующих компьютеров. И тогда было решено мозг пушистого хищника выбрать в качестве модели для нового проекта. Инженеры университета Мичигана приступили к задаче – смоделировать сложную компьютерную систему, взяв за основу мозг домашней кошки [5].

Интеллектуальные способности у животных. Дарвин считал, что в развитии психических способностей животных существует эволюционная непрерывность; он выступал против широко распространенного мнения о том, что животные представляют собой просто автоматы и по сравнению с человеком находятся на гораздо более низком уровне психического развития. В своей работе «Происхождение человека» (1871) Дарвин утверждал, что «животные обладают определенной способностью к рассудочной деятельности» и что «разница между психикой человека и психикой высших животных, как бы ни была она велика, – это, конечно, разница в степени, а не в качестве».

Хотя эта идея об эволюционной шкале способностей в виде некой лестницы и оказала заметное влияние на развитие психологии животных, однако в настоящее время эта точка зрения уже неприемлема. При изучении строения мозга (например, *Hodos*, 1982) и способностей животных различных видов (например, *Macphail*, 1982) стало совершенно очевидным, что животные различных видов в различных экологических условиях проявляют огромное разнообразие типов интеллектуальной деятельности. Это очень затрудняет определение понятия «интеллект», но и подчеркивает важность его исследования у животных с функциональной точки зрения, так же как и изучения обеспечивающих его механизмов.

Существуют два основных пути оценки интеллекта животных. Один из них состоит в том, чтобы оценивать поведение, а другой – в том, чтобы изучать мозг. Пытаясь осмыслить наше представление об интеллекте животных в свете современных данных нейроанатомии, Ходос (*Hodos*, 1982) приходит к следующему заключению: «Если мы сталкиваемся с признаками интеллекта у представителей животного мира и соотносим их со степенью развития нервных структур, мы должны отказаться от линейных, иерархически организованных, моделей, которые преобладают в обоих типах исследования. Нам следует принять более общее определение интеллекта, чем то, которое «привязано» к нуждам и оценкам человека. Мы должны признать тот факт, что история эволюции характеризуется дивергенцией и нелинейностью, и мы не можем ожидать плавных переходов от одного большого таксона к другому. Наконец, мы не можем себе позволить, чтобы наши знания о центральной нервной системе млекопитающих создавали у нас какие-либо предубеждения при поиске нервных коррелятов интеллекта у других классов позвоночных. Если мы не изменим таким образом наше мышление, у нас, по-видимому, останется мало надежды продвинуться хоть немного дальше в наших попытках понять взаимосвязи между психикой человека и психикой животного и соответствующими им нервыми субстратами».

Каждый инстинктивный акт представляет собой сложное переплетение врожденных и приобретенных элементов. Более того, анализ инстинктивного поведения приводит к выводу, что всё богатство и разнообразие полноценного психического отражения связаны с накоплением индивидуального опыта.

Индивидуальный опыт животного позволяет ему адаптироваться к условиям среды обитания, он способствует выживанию и успешному размножению конкретного животного. Индивидуально-приспособительная деятельность животного весьма разнообразна и состоит из

множества как врождённых, так и приобретённых компонентов разной природы. Самая большая доля этих компонентов приходится на разные формы обучения. В психологической литературе обычно фигурирует термин "научение", он, так же как и термин "обучение", на английском языке звучит "*learning*" и по своей сути означает совершенно одно и то же [5]!

Из существующих в настоящее время определений феномена "обучение" предпочтение отдается определению У. Торпа (*Thorpe*, 1963).

Обучение – это появление адаптивных изменений индивидуального поведения в результате приобретения опыта.

Индивидуально-приспособительная деятельность, помимо разных форм обучения, включает в себя и такой важнейший элемент, как рассудочная деятельность. Обучение играет исключительно важную роль в жизни животных и человека, поэтому изучению этой проблемы посвящено огромное количество научных исследований.

Формы обучения животных весьма многообразны, и поэтому существует целый ряд их классификаций: неассоциативное обучение; ассоциативное обучение; когнитивные процессы и, хотя и не бесспорно, инсайт-обучение.

До сих пор обнаруживаются новые, неизвестные ранее свойства носителей естественного интеллекта: ***коллективная память у бактерий и коллективное поведение.*** Группа животных имеет какой-то особый механизм принятия решений, не свойственный отдельным особям (*собственно, то же справедливо и для людей*). Учёные предположили два разных механизма принятия решений. *Первый* – решения принимаются элитарной группой «интеллектуалов», а остальные следуют за ними. *Второй* – в группе вступают в действие некие процессы самоорганизации, что и подтверждено экспериментально.

Обобщая, приходим к выводу, что интеллектом обладает всё живое на нашей планете Земля (*естественный интеллект*). Структура мозга и центральной нервной системы у всех без исключения носителей естественного интеллекта похожа – усложняясь от насекомых к млекопитающим.

***Формы обучения, самообучения и взаимного обучения систем естественного интеллекта – общие* [5].**

Далее рассмотрим особенности обучения систем естественного интеллекта, и, прежде всего, человека. Центральной фигурой процесса обучения, безусловно, должен выступать человек с его способностями и потенциалами интеллектуального и личностного развития. Цель обучения – дать человеку умение действовать, а знания должны стать средством обучения действиям, в помощь им.

Любое обучение (особенно обучение людей) содержит такие неотъемлемые элементы, как предоставление обучаемым информации, которая в мозгу обучаемых может превратиться в знания, а при включении в обучение практического применения этих знаний – в умения, и контроль обученности. Для контроля обученности обучаемым предлагается выполнить задания. Успешность выполнения заданий (время, затраченное на их выполнение, и правильность) позволяет оценить результативность обучения и приобретение умений и практических навыков. Автору не удалось найти результаты исследований, обнаруживших рассудочную, осмысленную, творческую деятельность у каких-либо носителей естественного интеллекта, кроме людей [5]. Поэтому далее будет рассматриваться обучение людей как одних из носителей естественного интеллекта. Автором создана предположительная модель любого процесса обучения [3]. Использованы идеи синергетики, проектного (мета-проектного) обучения, теория поэтапного формирования умственных действий проф. П.Я. Гальперина, технологии парного обучения, которые привели автора к идеи взаимного обучения, и электронное обучение (*e-learning*). Предложенная автором модель обучения позволила ему у студентов учебной группы активизировать и использовать присущие всей материей свойства самоорганизации, самоуправления и самообучения, создать эффективные модели системы подготовки будущих педагогов к профессиональной деятельности в условиях внедрения технологий *e-learning*. По наблюдениям автора и его коллег по работе (проф. А. И. Жорник и др.), процессы самообучения иногда запускаются в учебной группе спонтанно без

видимых причин. Это подтверждает утверждение, что синергетика – неотъемлемое свойство материи. Процессы самоорганизации и саморазвития могут идти всегда, но часто скрыто, незаметно (латентно). И только благодаря хаосу в точках бифуркации эти процессы выступают на первый план. Как уже упоминалось ранее [6, 7], задача преподавателя – найти законы развития учебной группы как системы: атTRACTоры, запускающие механизм переключения, смены различных режимов развития системы, переходов от одной относительно устойчивой структуры к другой, перехода от первоначальных незнания и неумения к конечным знаниям и умениям, обеспечивающие в целом саморазвитие системы.

Автором на протяжении многих лет проведены исследования по всем (более десяти) читаемым им предметам. Главный фактор, запускающий в учебной группе механизмы самоорганизации и самообучение – ситуация конструктивного хаоса. Рассмотрен вариант создания ситуации конструктивного хаоса при обучении студентов («правила игры»). Если в учебной группе преподавателем удачно создана ситуация конструктивного хаоса, то вышеупомянутые «правила игры» становятся атTRACTорами, запускаются механизмы самоорганизации-самообучения и проявляются эмерджентные свойства: учебная группа может быть разделена на две полярные подгруппы:

a) студенты, которые сами выполняют все задания в установленное время или даже быстрее (именно они образуют «островок самообразования»). Это активные лидеры самообучения. Посредством взаимного обучения подтягивают студентов своей группы до своего уровня;

b) студенты, которые не могут выполнять задания в установленное время по разным причинам. Они не лидеры обучения и нуждаются в помощи и взаимном обучении.

Это означает, что учебная группа приобретает новые свойства: самоорганизацию и самообучаемость, а в целом происходит саморазвитие учебной группы. На аудиторных занятиях студенты и преподаватель общаются непосредственно, а выполненные задания студенты могут присыпать преподавателю по электронной почте, общаясь как между собой, так и с преподавателем по мобильному телефону и *e-mail*. Студентам предоставляется постоянно обновляемый обширный электронный цифровой ресурс по предмету. Устанавливается система бонусов и штрафов. В каждой группе конструктивный хаос создаётся по-разному. Но в результате в учебной группе включаются механизмы самоорганизации, что проявляется в появлении лидеров, «островков самообразования» и взаимного обучения.

При обучении людей мы вряд ли сможем написать математические формулы, которые будут определять атTRACTоры перехода к самообучению. Но описать условия, при которых самоорганизация сможет возникать и развиваться в учебной группе, можно попытаться. Ключевой является создаваемая ситуация конструктивного хаоса. Что может претендовать на роль атTRACTора? На наш взгляд, важно, чтобы у обучаемого были мотив и смысл обучения. Мотив создает преподаватель, будучи интересным, хорошо зная свой предмет и проводя занятия так, чтобы студентам захотелось его изучать. Как иногда об этом говорят, надо «зажечь» студента. Большую роль играют вводимые бонусы для самых активных студентов за лучшие задания, выполненные в срок. В учебной группе возникает установка состязания: кто сделает лучше и быстрее. А награда от преподавателя в виде бонуса является хорошим стимулом. Студенту хочется заработать бонус и избежать штрафа. Очень важными элементами являются свобода действий студентов и возможность взаимодействия [2]. Полезно учитывать идеи нейропедагогики.

В одной из своих работ автор предлагает студенческую учебную группу вместе с преподавателем рассматривать как интеллектуальную систему, которая обладает свойством самоорганизации [4]. Самоорганизация проявляется как самообучение и взаимное обучение. Такое поведение не является каким-то «стадным» инстинктом, и его можно назвать целенаправленным развитием (эволюцией) от незнания и неумения к знанию и умению применительно к данному или любому другому изучаемому предмету.

Продолжая исследования модели обучения, автор обнаружил новые, еще неизвестные свойства [1]. Первое, на что следует обратить внимание, модель обучения представляет не застывшую, неизменную форму. Модель обучения отображает процесс обучения, т.е. как процесс изменяется, развивается во времени. Поэтому будут рассматриваться срезы, как бы фотографии

(ключевые кадры) этого процесса, отображающие изменения в учебной группе. На первом занятии преподаватель (Пр) выдаёт студентам свой (бесплатный) электронный ресурс (ЭР) по предмету и объясняет особенности авторской модели обучения. ЭЖ – электронный журнал обучения. Преподаватель выдал электронный ресурс, объяснил «правила игры», дал свои контакты: *e-mail* и мобильный телефон. Также предложил студентам, тем, кто хочет, сообщить свои контакты, хотя бы мобильный телефон. На удивление, все студенты сообщили преподавателю свои номера мобильных телефонов. Это говорит об **эффекте привыкания** (*неассоциативное обучение*) и о желании студентов общаться с преподавателем и друг с другом.

Главная особенность предложенной нами концепции динамической модели обучения группы – это эволюция учебных групп [5]. Термин «эволюция» происходит от латинского *evolution*, что в переводе означает «развертывание». Понятие эволюции используется в узком и широком смыслах. Нами понятие эволюции будет рассматриваться в широком смысле как саморазвитие и усложнение от простейших форм вплоть до появления сложных образований [2]. Можно утверждать, что первые два кадра модели обучения (а и б) – общие для всех предметов и групп и отличаются только количеством студентов. В результате обучения между членами учебной группы образуются связи (*синаптические, или нейронные связи – по аналогии с нейронными сетями, авт. – В.Г.*) [4], *взаимное обучение и межличностные отношения*. Т. е. по аналогии с нейронными сетями можно сказать, что учебная группа по данному предмету может быть условно названа подобной по своему групповому поведению настроенной или обученной нейронной сетью и может выполнять задания преподавателя по данному предмету [2]. Сохраняются или развиваются эти связи, как меняется в одной и той же учебной группе конфигурация этих связей в зависимости от изучаемого предмета или в зависимости от выполняемого задания по одному предмету – это предмет настоящих и дальнейших исследований.

Автором предложена концепция динамической модели обучения группы и инструменты диагностики эмерджентных свойств: появления самоорганизации-самообучения и взаимного обучения.

Основной источник информации для этого – электронный журнал преподавателя. Автор на протяжении ряда лет искал и отрабатывал методики обработки данных электронного журнала, приведённых в докладах, статьях и монографиях [2, 6]. Особенностью авторской модели самообучения является ведение электронного журнала учёта обучения для каждой учебной группы по каждому предмету. Предлагаемый автором электронный журнал преподавателя представляет собой таблицу, в ячейках которой приведены фамилия, имя, отчество каждого студента и указаны все задания по предмету, которые студентам предстоит выполнить в ходе обучения. В ячейки таблицы преподаватель заносит дату выполнения каждого задания. Иногда студенты с первого раза не сдают задание. В этом случае в ячейке таблицы могут быть две и более даты. В электронный журнал удобно заносить и результаты аттестации: зачет и экзамен. Чтобы данные электронного журнала можно было обрабатывать и анализировать, необходимо в каждой ячейке оставить только одну дату, последнюю. Затем данные электронного журнала копируются и переносятся в электронную таблицу *Microsoft Excel*. Далее преобразуется формат данных в формат Дата «Образец: 14.3». В ходе обработки данных у автора возникла идея обрабатывать данные по столбцам, используя сортировку данных в электронной таблице *Microsoft Excel*. Сначала автор предложил строить по данным журнала графики, затем точечные диаграммы. И только в своих последних работах и монографиях [2, 5] автор предлагает по данным электронного журнала строить диаграммы выполнения заданий во времени и графики времени выполнения заданий. *Отсчёт времени удобнее вести от первого занятия по предмету*. Тогда можно получить информацию о том, сколько времени затратил каждый студент на выполнение задания.

Правила (*алгоритм*) анализа и обработки данных для всех групп и всех предметов идентичны: сначала приводится электронный журнал обучения, и далее – диагностика включения самоорганизации-самообучения: диаграммы выполнения заданий по предмету во времени, графики времени выполнения заданий. По данным матрицы переходов строятся 3D-диаграммы переходов для оценки результативности обучения. В завершение приводится анализ связей и с учётом

межличностных отношений и взаимного обучения – построение динамической модели обучения со связями (*третий кадр*) [2].

Рассмотрены эволюционные процессы в динамических моделях одной и той же учебной группы, построенные автором для периодов обучения с первого по третий курс (рис. 1). Состав учебной группы изменился незначительно: ушли 2 человека (с номерами 2 и 4) после первого семестра, прибавился 1 человек (с номером 12) на втором курсе.

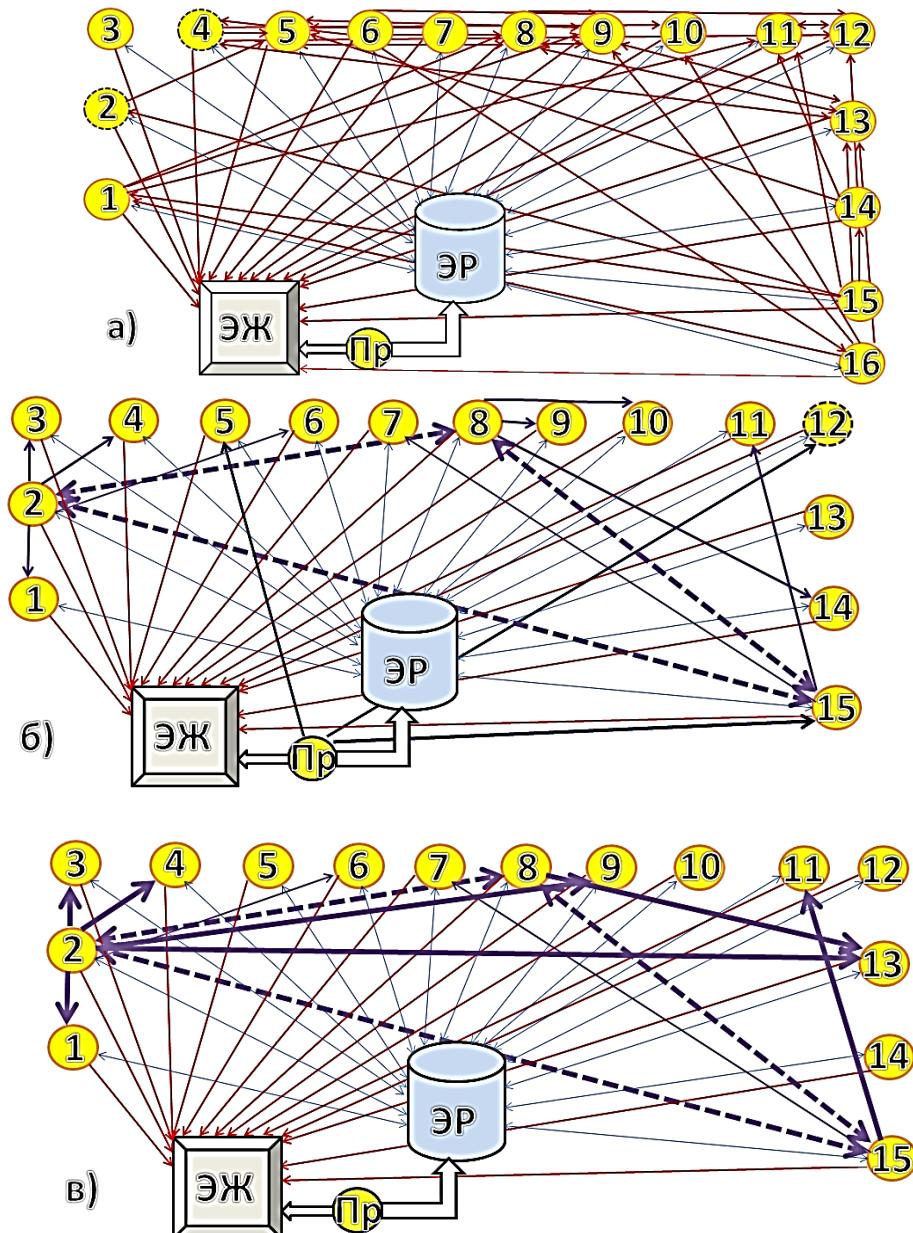


Рисунок 1 – Динамическая модель обучения:
 а) группы Ф-13 (2013/2014); б) группы ТЕХ-121 (2014/2015); в) группы ТЕХ-131 (2015/2016)

В группе первого курса (Ф-13) выделяется студентка с номером 3 (рис. 1, а), которая все задания выполнила одна, самостоятельно. Входя в число лидеров, ни с кем из своей учебной группы не взаимодействовала, держалась сама по себе. В связи с небольшим изменением состава группы на втором и третьем курсах она получила номер 2. Лидерами оказались студентки с номерами 15 и 16, которые на втором и третьем курсах обозначены номерами 14 и 15. Две девушки-лидеры с номерами 2 и 4 перешли после этого семестра в другие группы. Остальные студенты очень интенсивно общались, взаимодействовали, помогали друг другу учиться и выполнять задания, при этом лучше

узнавая друг друга. Вся группа выполнила все задания, а особенности обучения студентов по предмету отражены в работе автора [1].

На втором курсе (рис. 1, б) в группе ТЕХ-121 образовалась «триада» лидеров: девушки с номерами 2, 8 и 15, которые являлись как бы мозговым центром группы. Эти девушки, особенно с номером 15, охотно принимали помошь преподавателя, а задания по довольно сложным темам, связанным с моделированием технологических процессов, выполняли самыми первыми. Задания по предмету – это математическая статистика, планирование эксперимента и оптимизация статистических моделей. Единственные в группе лидеры «триады» активно взаимодействовали с остальными студентами своей группы, подтягивали их по возможности до своего уровня, объясняли и помогали выполнять сложные задания. Преподавателю пришлось взять шефство над новенькой студенткой (с номером 12) и студентом с номером 5, у которых был низкий уровень математической подготовки. Студентка с номером 13 смогла самостоятельно выполнить все задания (*по её словам*), но это позволяет сделать вывод о её неискренности. Вся группа выполнила все задания.

На третьем курсе (рис. 1, в) в группе ТЕХ-131 сохранилась «триада» лидеров как устойчивая структура: девушки с номерами 2, 8 и 15, которые являются как бы мозговым центром группы. Но появились и отдельные, независимые от «триады», лидеры с номерами 5, 6, 7 и 14. Студентка с номером 12 немножко не дотянула до лидерства, но своё оригинальное задание выполнила очень качественно.

Итак, можно сказать, что приведённые выше результаты подтверждают утверждение автора об эволюционных процессах в учебной группе, происходящих при обучении. А это уже не только педагогика или узкая дидактика. Обучение людей – сложный эволюционный процесс, исследование которого результативнее проводить на стыке наук: синергетики, педагогики, психологии [2].

Преподаватель является неотъемлемой частью учебной группы, изучающей его предмет. Он должен выступать не как «небожитель», а как равноправный член учебной группы, доступный для всех, с которым студенты могут и хотят общаться. Такое положение нисколько не снижает роли преподавателя, а наоборот, повышает его до фасилитатора, тьютора, организатора и координатора эволюционного процесса обучения и воспитания.

Не стоит забывать очевидную истину о предназначении: все учебные заведения созданы для обучаемых, в нашем случае высшие учебные заведения – для студентов.

В ходе построения и анализа динамических моделей было обнаружено не только проявление лидеров, но и образование новых устойчивых структур внутри учебной группы – объединение лидеров. В нашем случае – образование *триады лидеров*. Предложенная динамическая модель обучения показывает большое значение внутригруппового взаимодействия как между студентами, так и между студентами и преподавателем. Использование автором технологий электронного обучения не снижает интенсивности упомянутых взаимодействий, а расширяет возможности преподавателя.

В осеннем семестре 2015/2016 учебного года группа **ТЕХ-131** изучала предмет «Компьютерная поддержка технологических дисциплин», часть 2. Вся группа успешно освоила предмет. Исследования эволюционных процессов в группе ТЕХ-131 были продолжены в весеннем семестре 2015/2016 учебного года при изучении предмета «Компьютерная поддержка технологических дисциплин, часть 3» (рис. 2). В весенном семестре 2015/2016 учебного года группа ТЕХ-131 изучала предмет «Компьютерная поддержка технологических дисциплин», часть 3. Вся группа успешно освоила предмет. В группе ТЕХ-131 сохранилась «триада» лидеров как устойчивая структура, но только при выполнении Задания 1 Тест: девушки с номерами 2, 8 и 15, которые являются как бы мозговым центром группы. Но появились и отдельные, независимые от «триады» лидеры (*студенты с номерами 5, 6, 7, 12, 4, 11, 13, 1*). Уже при выполнении Задания 2 Реферат «триада» лидеров вроде бы формально распалась. Причины самые разные.

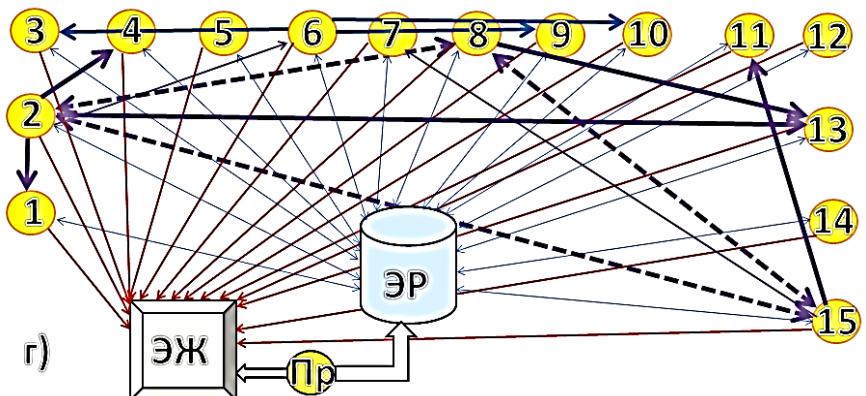


Рисунок 2 – Модель обучения по предмету «Компьютерная поддержка технологических дисциплин», часть 3 для группы ТЕХ-131

Студентка с номером 15 по поручению преподавателя готовила довольно серьёзный доклад *«Поведение с элементами самоорганизации в группах некоторых представителей систем естественного интеллекта»* на 59-ю научную студенческую конференцию ТИ имени А.П. Чехова. Также выяснилось, что студентка с номером 6 (*а это староста группы*) очень активно помогала выполнить Задание 1 Тест отстающим студентам с номерами 3, 9, 10. Без выполненного Задания 1 Тест эти студенты не смогли бы сдать экзамен по предмету, а часть студентов уже работали вожатыми в различных детских оздоровительных центрах в зачёт педагогической практики.

Так, например, как показали беседы со студентами группы ТЕХ-141 (а это группа ТЕХ-131, которая перешла на 4-й курс...), «триада лидеров» сохранилась. Также сохранились и отдельные, независимые от «триады» лидеры (студенты с номерами 5 и 6, т.е. не все...). В текущем 2016/2017 учебном году исследования продолжаются, и автор надеется привести результаты этих исследований в своих новых научных статьях и очередной монографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горбатюк, В.Ф. Динамическая модель обучения – эволюционные процессы. // Вестник Таганрогского института имени А.П. Чехова. – Таганрог: Таганрог. ин-т имени А.П. Чехова (филиал) ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)», 2016. - №2, 309 с. – с. 76-83 [электронное издание] - URL <http://www.tgpi.ru/science/herald-tgpi>
- Горбатюк, В.Ф. Обучение самоорганизующихся систем естественного интеллекта: монография / В.Ф. Горбатюк. // Таганрог: Изд. отдел Таганрог. ин-та имени А.П. Чехова, 2015. – 204 с.
- Горбатюк, В.Ф. Предположительная модель любого процесса обучения на примере группы ТЕХ-111.// Вестник Таганрогского института имени А.П. Чехова. – Таганрог: Таганрог. ин-т имени А.П. Чехова (филиал) ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)», 2017. - №2, 286 с. – с. 45-53 [электронное издание] – URL <http://www.tgpi.ru/science/herald-tgpi>
- Горбатюк, В.Ф. Самоорганизация, самообучение и взаимное обучение в студенческой группе // Сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015, с. 334-344.
- Горбатюк, В.Ф. Самоорганизация, саморазвитие, обучение и взаимное обучение систем естественного интеллекта: монография/ Таганрог–Ростов-на-Дону: Легион-М, 2016.- 240 с.
- Горбатюк, В.Ф. Синергетика в современном обучении: Монография – Таганрог: Изд-во Таганрог. гос. пед. ин-та им. А.П. Чехова, 2012. – 208 с.
- Горбатюк, В.Ф. Эмерджентность и конструктивный хаос в авторской модели самообучения // Школа будущего. – 2013. – № 2. – с. 3–11.

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ПРОГРАММАМ В СООТВЕТСТВИИ С КОНЦЕПЦИЕЙ CDIO

Аннотация. В статье рассмотрен поэтапный процесс планирования результатов обучения в соответствии с международной инициативой CDIO. Даны рекомендации по выбору стейкхолдеров, проведению их опроса и анализу результатов, на основе которых формулируется структура планируемых результатов обучения. На примере деятельности Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета представлены результаты работы с ключевыми стейкхолдерами, позволяющие уточнить требования к результатам обучения.

Ключевые слова: концепция CDIO, CDIO Syllabus, результаты обучения проектное обучение, инженерное образование.

Annotation. Features of learning outcomes planning in accordance with CDIO are considered. Recommendations on the choice of stakeholders, their survey and analysis of the results are given. Based on these results, the structure of planned learning outcomes is formulated. On the example of the Institute of Computer Technologies and Information Security of the Southern Federal University, the results of work with key stakeholders are presented, which make it possible to clarify the requirements for learning outcomes.

Keywords: CDIO concept, CDIO Syllabus, learning outcomes project training, engineering education.

В современных условиях задача совершенствования подготовки инженерных кадров выдвигает учёт определённых требований к организации образовательного процесса [1, 5, 7]:

- обучение через исследования и разработки, проектная деятельность, проблемно-ориентированное обучение, ориентация на стандарты CDIO;
- перенос акцентов с усвоения информации на её анализ и производство знаний, технологий и других продуктов;
- перенос части процесса обучения в реальную производственную среду, привлечение преподавателей-практиков и экспертов-практиков;
- самоорганизация и самоуправляемое обучение, активность и вовлеченность студента в процесс обучения;
- компетентностно-ориентированные подходы к оценке образовательных результатов.

Всемирная инициатива CDIO (англ. Conceive – Design – Implement – Operate; русс. «Планирование – Проектирование – Применение – Производство») – международный проект по реформированию инженерного образования и преодоление существующего разрыва между теорией и практикой в подготовке будущих инженеров [2-4, 8].

Планируемые результаты обучения (CDIO Syllabus) в соответствии с концепцией CDIO обозначают, что при подготовке квалифицированного инженера необходимо обеспечить овладение выпускником следующими наборами компетенций:

- дисциплинарные знания и основы: базовые знания математики и естественных наук; ключевые знания основ инженерного дела; углублённые знания основ инженерного дела, методов и инструментария;
- профессиональные компетенции и личностные качества: аналитическое обоснование и решение проблем; экспериментирование, исследование и приобретение знаний; системное мышление; позиция, мышление и познание; этика, справедливость и другие виды ответственности;
- межличностные умения: работа в команде и коммуникации на русском и иностранном языках;

- планирование, проектирование, производство и применение продукции (систем) в контексте предприятия, общества и окружающей среды: социальный и экологический контекст; предпринимательский и деловой контекст; планирование, системный инжиниринг и менеджмент; проектирование; производство; применение; лидерство в инженерном предприятии; инженерное предпринимательство.

Планирование результатов обучения по инженерным образовательным программам в соответствии с концепцией CDIO рекомендуется осуществлять в соответствии с определёнными этапами:

- определение первичных данных, формулирование целей образовательной программы;
- формирование группы ключевых стейкхолдеров (работодатели, преподаватели, студенты, выпускники);
- опрос ключевых стейкхолдеров и анализ полученных результатов с целью формирования требуемых атрибутов выпускника образовательной программы;
- формирование первичной структуры результатов обучения с учётом требований образовательных стандартов и планируемых результатов обучения в соответствии с CDIO Syllabus;
- опрос ключевых стейкхолдеров по предлагаемой первичной структуре результатов обучения и анализ полученных результатов опроса и предложений по формулировкам отдельных результатов обучения;
- формирование окончательной структуры результатов обучения с детализацией до заданного уровня декомпозиции.

Отдельно стоит отметить, что на этапе формирования группы ключевых стейкхолдеров необходимо с учётом поставленных целей образовательной программы выбрать ключевых партнёров со стороны работодателей, максимально заинтересованных в подготовке инженеров по данной программе.

Опрос ключевых стейкхолдеров и анализ полученных результатов должен позволить сформировать представления о требуемых атрибутах выпускника образовательной программы (со стороны работодателей, преподавателей, самих обучающихся и выпускников прошлых лет). Результаты анализа могут быть полезны для корректировки поставленных целей образовательной программы, если, например, окажется, что видение планируемых результатов обучения со стороны разработчика программы и заинтересованных работодателей существенно различаются.

Сформулированная на следующем этапе первичная структура результатов обучения, которые являются составной частью основной профессиональной образовательной программы, должна отвечать следующим требованиям:

1. Соответствовать образовательному стандарту высшего образования.
2. Соответствовать требованиям концепции CDIO и CDIO Syllabus.
3. Учитывать требования ключевых стейкхолдеров.

В качестве основания при формировании структуры результатов обучения возможно использовать перечень компетенций, задаваемые образовательным стандартом, так как формирование этих компетенций при освоении образовательной программы является обязательным требованием для государственной аккредитации образовательной программы. При этом следует отметить, что в соответствии с образовательными стандартами высшего образования:

• во-первых, при разработке и реализации образовательной программы организация, как правило, может ориентироваться на конкретные вид (виды) профессиональной деятельности, к которому (которым) готовится выпускник, исходя из потребностей рынка труда, научно-исследовательских и материально-технических ресурсов организации (то есть не все виды профессиональной деятельности выпускника, перечисленные в образовательном стандарте, должны выступать в качестве ориентира разрабатываемой образовательной программы);

• во-вторых, при разработке программы все общекультурные и общепрофессиональные компетенции, а также профессиональные компетенции, отнесённые к тем видам профессиональной деятельности, на которые ориентирована образовательная программа, включаются в набор требуемых результатов освоения программы бакалавриата;

- в-третьих, при разработке программы бакалавриата организация вправе дополнить набор компетенций выпускников с учётом направленности программы бакалавриата на конкретные области знания и (или) вид (виды) деятельности.

Для решения задачи интеграции в планируемые результаты освоения образовательно программы результатов обучения, приведённых в CDIO Syllabus, необходимо провести анализ соответствия этих перечней.

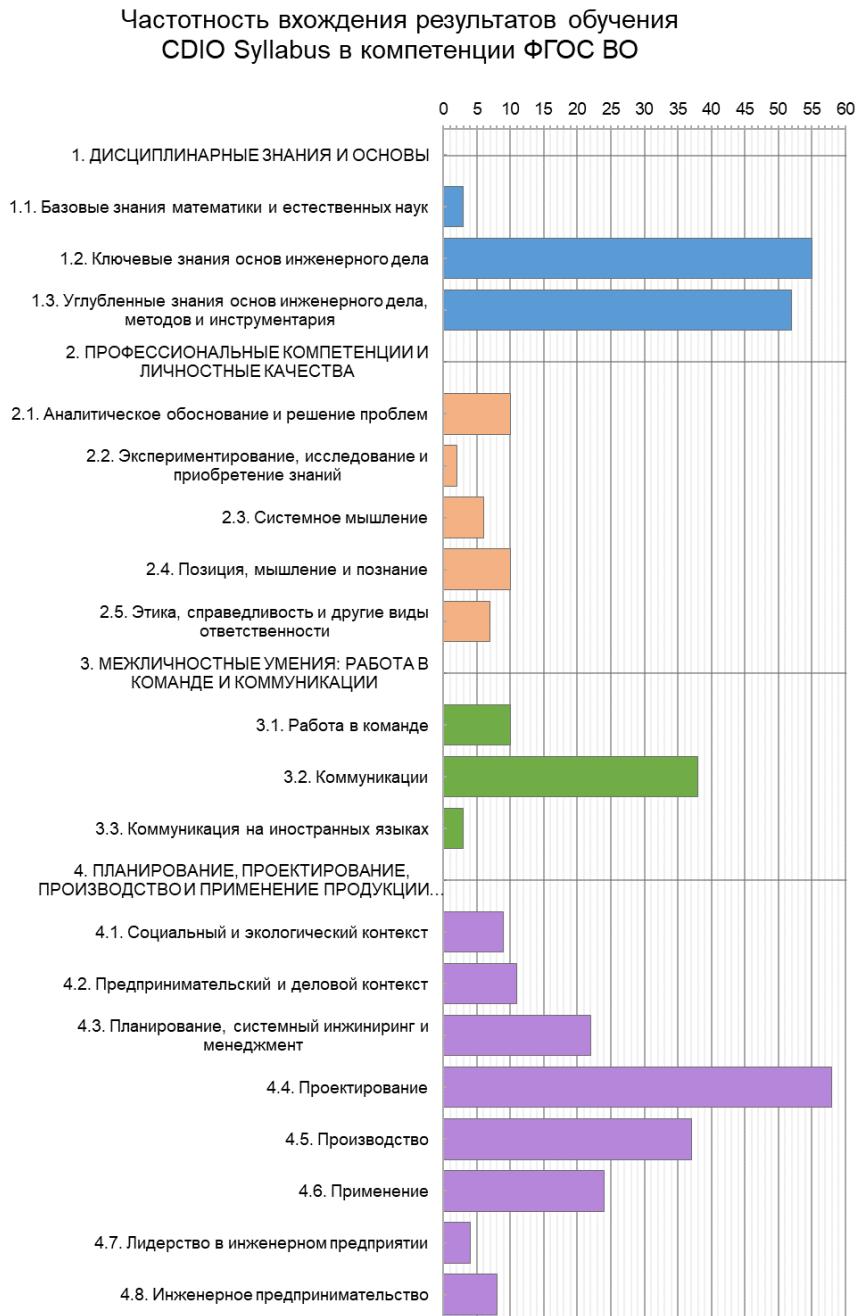


Рисунок 8 – Отражение результатов обучения по CDIO Syllabus в результатах обучения согласно ФГОС ВО направления 09.03.04 Программная инженерия

На рисунке 1 представлен пример отражения результатов обучения по CDIO Syllabus в результатах обучения согласно федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) направления 09.03.04 Программная инженерия, реализуемого в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета. По оси абсцисс отложена частотность вхождения результатов обучения из CDIO Syllabus в компетенции из ФГОС ВО в соответствии с первичной структурой результатов обучения. Частотность вхождения рассчитывалась с точностью до 3-го уровня декомпозиции.

Из рисунка 1 видно, что при декомпозиции до 2-го уровня все результаты обучения, приведённые в CDIO Syllabus, в той или иной мере отражены во ФГОС ВО.

Баланс результатов обучения выпускника направления 09.03.04 Программная инженерия по основным категориям, отмеченным в CDIO Syllabus (1-й уровень декомпозиции), приведён на рисунке 2. Диаграмма построена в нормированном виде, то есть сумма вкладов всех четырёх категорий результатов обучения приведена к 100%.

Как видно из рисунка 2, наиболее полно в перечне компетенций ФГОС ВО 09.03.04 отражены результаты обучения CDIO Syllabus по категориям «4. Планирование, проектирование, производство и применение продукции (систем) в контексте предприятия, общества и окружающей среды» (46,9%) и «1. Дисциплинарные знания и основы» (29,8%).

Баланс компетенций ФГОС ВО по основным категориям результатов обучения CDIO Syllabus

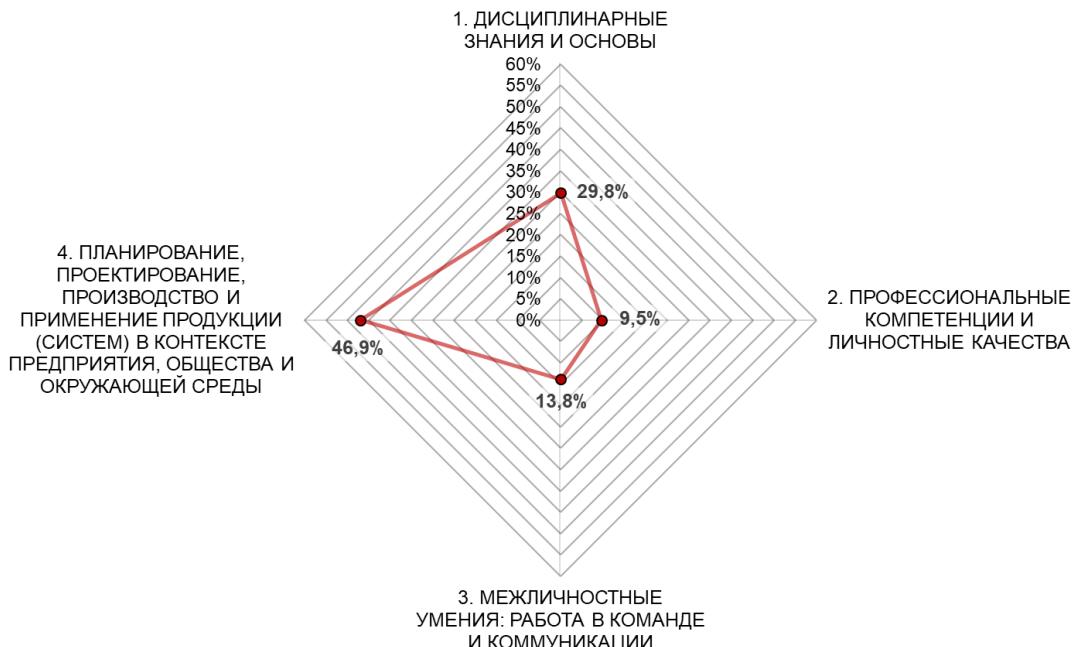


Рисунок 2 – Баланс компетенций выпускника по основным категориям CDIO Syllabus

При более детальном анализе (до 3-го уровня декомпозиции) можно обнаружить несколько результатов обучения по CDIO Syllabus, которым не удалось поставить в соответствие компетенции из ФГОС ВО:

- 1.1.2. Физика;
- 1.1.3. Химия;
- 1.1.4. Биология;
- 4.5.2. Процесс производства аппаратной продукции;
- 4.7.1. Выявление проблем и парадоксов;
- 4.7.2. Творческое мышление и коммуникационные возможности;
- 4.7.3. Определение решения;
- 4.7.4. Создание концепций нового решения;
- 4.7.5. Создание и лидерство в организации и за ее пределами;
- 4.7.7. Реализация проекта/защита решения и критическое обоснование.

Отсутствие во ФГОС ВО компетенций, направленных на формирование способностей понимать естественнонаучную картину мира, приводит к тому, что дисциплинарные навыки по физике (1.1.2), химии (1.1.3), биологии (1.1.4) не востребованы напрямую стандартом. Отсутствие результата 4.5.2 объясняется тем, что инженеры-программисты в своей профессиональной деятельности не занимаются производством аппаратной продукции. Отсутствие многих

результатов из пункта 4.7 (Лидерство в инженерном предприятии), можно отнести к недостатку ФГОС ВО, который можно устранить, например, введением дополнительной профессиональной компетенции.

Также есть достаточно много результатов обучения 3-го уровня декомпозиции CDIO Syllabus, которым поставлена в соответствие только одна компетенция из ФГОС ВО, причём такое соответствие зачастую весьма условно. К таким результатам, в основном, относятся результатов обучения из пунктов 4.7 (Лидерство в инженерном предприятии) и 4.8 (Инженерное предпринимательство). Это позволяет сделать вывод, что несмотря на то, что некоторым результатам обучения, перечисленные в пунктах 4.7 и 4.8 CDIO Syllabus соответствуют компетенции ФГОС ВО ОК-3 (Способность использовать основы экономических знаний в различных сферах жизнедеятельности) и ОК-4 (Способность использовать основы правовых знаний в различных сферах жизнедеятельности), только за счёт формирования этих компетенций невозможно достичь результатов 4.7 и 4.8 CDIO Syllabus, поэтому введение в образовательную программу дополнительных компетенций, направленных на формирование соответствующих результатов обучения, является необходимым.

На рисунке 3 приведена проекция компетенций выпускников, описанных во ФГОС ВО направления 09.03.04 Программная инженерия, на результаты обучения согласно CDIO Syllabus. В качестве профессиональных компетенций рассматривались только компетенции, относящиеся к выбранным видам профессиональной деятельности. По оси абсцисс на графике отложена частотность соответствия компетенций из ФГОС ВО с результатами обучения из CDIO Syllabus (до 3-го уровня декомпозиции) согласно с первичной структурой результатов обучения.

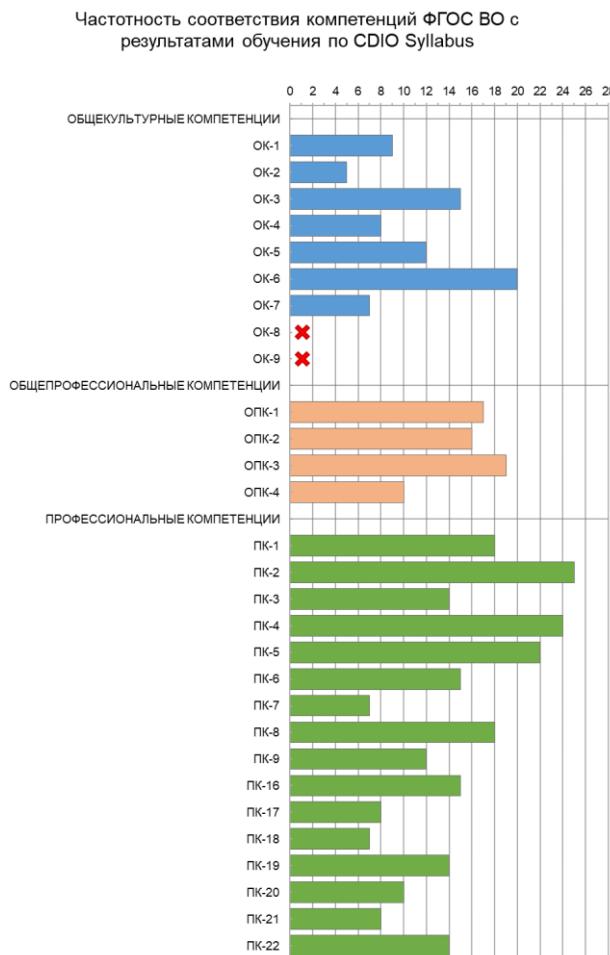


Рисунок 3 – Отражение компетенций из ФГОС ВО, планируемых к использованию в разрабатываемой образовательной программе, в результатах обучения из CDIO Syllabus

Можно отметить, что большинство компетенций ФГОС достаточно полно представлены в CDIO Syllabus. Вместе с тем, в CDIO Syllabus отсутствуют результаты обучения, связанные с

физической культурой (во ФГОС ВО имеется компетенция ОК-8 – Способность использовать методы и средства физической культуры для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности) и безопасностью жизнедеятельности (во ФГОС ВО имеется компетенция ОК-9 – Способность использовать приёмы первой помощи, методы защиты в условиях чрезвычайных ситуаций). Для устранения этого противоречия в разрабатываемую структуру результатов обучения необходимо будет ввести дополнительные разделы.

Баланс результатов обучения выпускника по основным категориям компетенций ФГОС ВО приведён на рисунке 4.

Баланс результатов обучения CDIO Syllabus по категориям компетенций ФГОС ВО

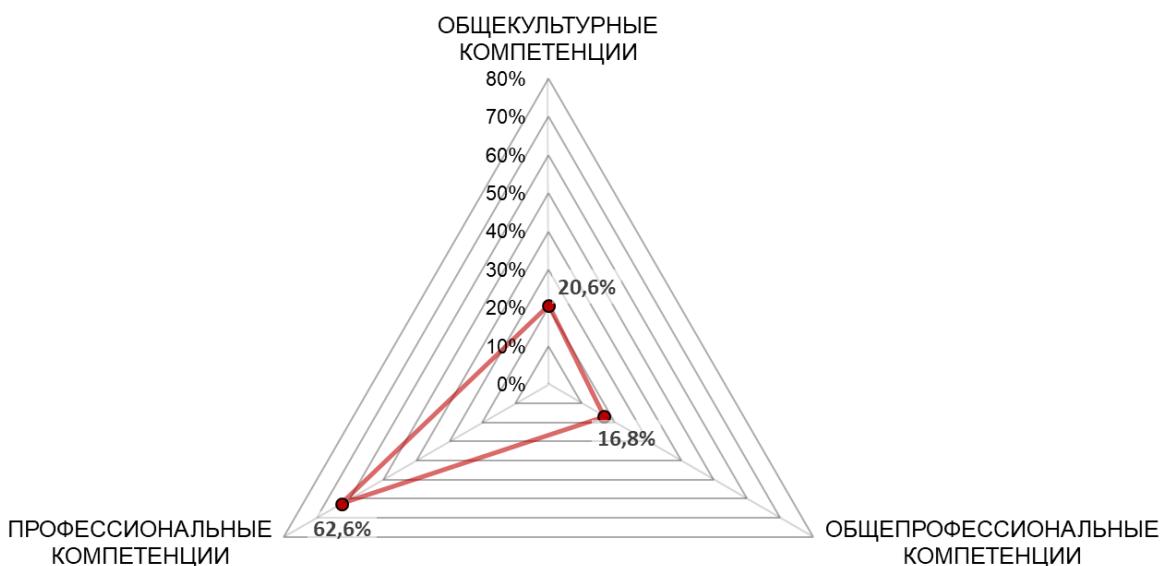


Рисунок 4 – Баланс компетенций выпускника по основным категориям ФГОС ВО

Как видно из диаграммы, наиболее полно в перечне результатов обучения CDIO Syllabus отражена категория профессиональных компетенций из ФГОС ВО. Это можно объяснить, в первую очередь, преобладанием профессиональных компетенций по количеству над другими видами компетенций. Таким образом, формирование первичной структуры результатов обучения с учётом требований образовательных стандартов и планируемых результатов обучения в соответствии с CDIO Syllabus зачастую позволяют сделать вывод, что имеющиеся противоречия между перечнем компетенций из ФГОС ВО и результатами обучения из CDIO Syllabus могут быть разрешены за счёт, во-первых, расширения списка результатов обучения разрабатываемой образовательной программы относительно типовой структуры CDIO Syllabus (например, добавление результатов обучения в части физической культуры и безопасности жизнедеятельности), во-вторых, введением в образовательную программу дополнительных компетенций по сравнению с ФГОС ВО (например, добавление компетенций по инженерному предпринимательству). Решение по целесообразности включения в список результатов обучения в пункте 1.1 (Базовые знания математики и естественных наук) результатов, связанных с дисциплинами физика, химия, биология (которые не требуются напрямую ФГОС ВО), должно приниматься на основе оценки первичной структуры результатов обучения стейкхолдерами.

В итоге формирование первичной структуры планируемых результатов обучения может выполняться следующим образом:

- в качестве основы взять результаты обучения, изложенные в CDIO Syllabus;

- дополнить список результатов обучения из CDIO Syllabus в части требований к дисциплинарным знаниям и основам (раздел 1) исходя из списка обязательных общепрофессиональных и выбранных профессиональных компетенций, приведённых в образовательном стандарте, в том числе дополнить список результатов обучения из CDIO Syllabus по базовым знаниям математики (пункт 1.1.1) перечнем разделов высшей математики и связанных с ней дисциплин, традиционно читаемых для студентов направления 09.03.04 Программная инженерия;

- дополнить список CDIO Syllabus компетенциями в области физической культуры (новый раздел 5 «Физическая культура, спорт и культура здоровья») и безопасности жизнедеятельности (новый раздел 6 «Безопасность жизнедеятельности») для приведения в соответствие требованиям ФГОС ВО.

На следующем этапе сформулированная первичная структура результатов обучения оценивается группами стейкхолдеров (разные разделы структуры для проведения оценок могут приводиться с разным уровнем декомпозиции).

В качестве примера на рисунке 5 показана оценка значимости профессиональных компетенций и личностных качеств (раздел 2 результатов обучения по CDIO Syllabus) в разрезе групп стейкхолдеров (оценка проводилась по 5-балльной шкале).

2. Профессиональные компетенции, личностные и межличностные качества

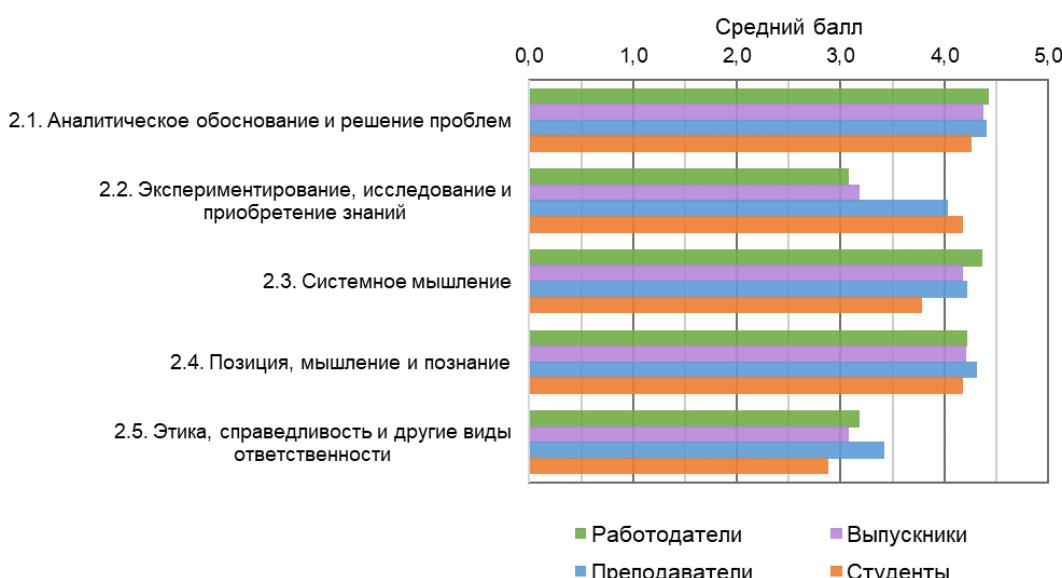


Рисунок 5 – Оценка значимости профессиональных компетенций, личностных и межличностных качеств группами стейкхолдеров

Видно, что три из пяти результатов в разделе профессиональных компетенций, личностных и межличностных качеств были признаны всеми группами стейкхолдеров очень важными (средний балл выше четырёх). Исключение составили результаты «2.5. Этика, справедливость и другие виды ответственности».

На рисунке 6 приведены средние оценки по рассмотренным разделам результатов обучения 1-4 (на первом уровне декомпозиции по CDIO Syllabus), а также по новым вводимым разделам «5. Физическая культура, спорт и культура здоровья» и «6. Безопасность жизнедеятельности» в разрезе групп стейкхолдеров.

Средние оценки по разделам 1-6 результатов обучения

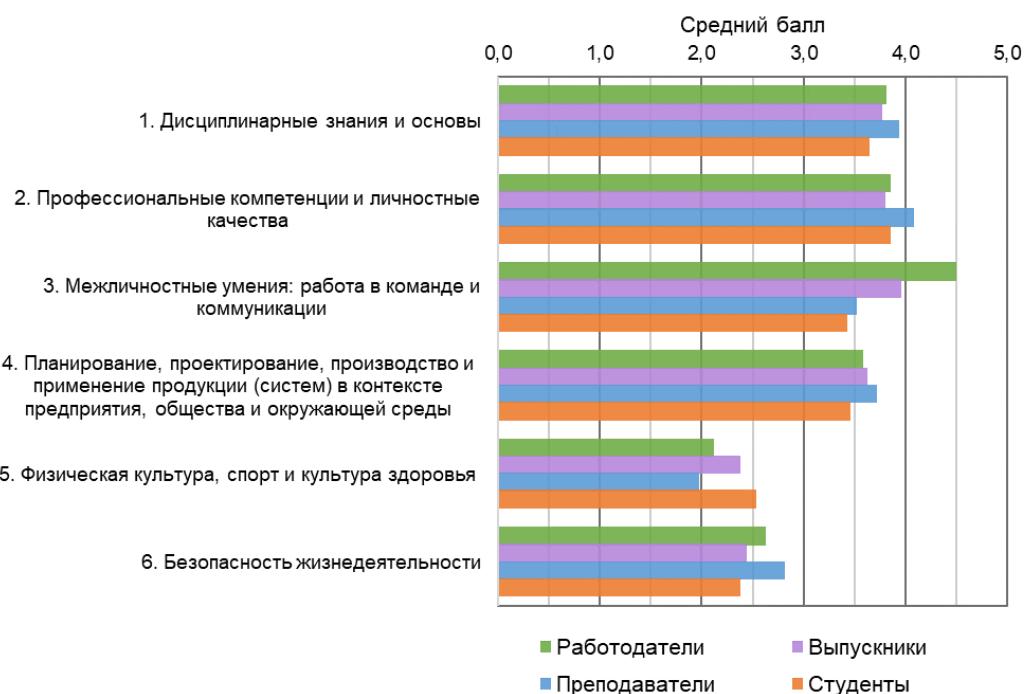


Рисунок 6 – Оценка значимости результатов обучения по основным разделам группами стейкхолдеров

Полученные средние оценки по разделам результатов обучения 1-4 позволяют сделать вывод, что формулировки результатов обучения нашли понимание со стороны всех ключевых стейкхолдеров. Также стоит отметить более высокую оценку значимости результатов обучения по межличностным умениям, работе в команде и коммуникациям со стороны работодателей (особенно по сравнению с оценками данной категории преподавателями и студентами).

Анализ полученных результатов опроса ключевых стейкхолдеров позволит сделать определённые выводы относительно предложенной первичной структуры результатов обучения, например:

- в области базовых знаний математики и естественных наук значимость результатов обучения оценены в целом как умеренно-важные, при этом оценка математики лежит ближе к «очень важные результаты обучения», физики – «умеренно-важные результаты обучения», а химия и биология по мнению стейкхолдеров даёт «незначительные результаты обучения». Такой результат позволяет принять решение отказаться в образовательной программе от дисциплин «Химия» и «Биология», а дисциплину «Физика» заменить на дисциплину «Концепции современного естествознания» (в которую отдельными разделом могут быть включены современные концепции химии и биологии);

- работодатели и выпускники немного выше оценивают важность результатов обучения по углублённым знаниям основ инженерного дела, методам и инструментарию, чем важность ключевых знаний основ инженерного дела, а преподаватели и студенты – наоборот;

- большинство результатов обучения по профессиональным компетенциям, личностным и межличностным качествам всеми группами стейкхолдеров оценены как очень важные, за исключением результатов по этике, справедливости и другим видам ответственности;

- усреднённая оценка результатов обучения в разделе межличностных умений, работы в команде и коммуникациям по всем категориям стейкхолдеров лежит на уровне «очень важные результаты обучения», но показателен разброс оценок у различных категорий стейкхолдеров – например работу в команде работодатели оценили как «основные результаты обучения» (наиболее

высокий уровень важности), а студенты – всего лишь как просто «важные результаты обучения» (что на две ступени ниже);

• большинство результатов обучения по планированию, проектированию, производству и применению продукции (систем) в контексте предприятия, общества и окружающей среды всеми группами стейкхолдеров оценены как очень важные, за исключением результатов в части социального и экологического контекста; при этом также получены высокие оценки по результатам обучения в части лидерства в инженерном предприятии и инженерному предпринимательству, что подтвердило сделанный ранее вывод о необходимости расширения списка компетенций ФГОС ВО путём добавления отдельных компетенций по инженерному предпринимательству.

На основе полученных в ходе опросов предложений работодателей, преподавателей и выпускников должны быть сформулированы детализированные требования к результатам обучения в общепрофессиональной и профессиональной сферах, то есть ключевым и углублённым знаниям основ инженерного дела, методов и инструментария.

Полученная детализированная структура результатов обучения в дальнейшем может являться основой разработки рабочих программ отдельных дисциплин образовательной программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Лызь Н.А., Веселов Г.Е., Лызь А.Е. Построение будущего: опыт поэтапного совершенствования инженерного образования // Высшее образование в России. 2017. №5. – С. 15–22.
2. Трещев А.М., Сергеева О.А. Всемирная инициатива cdio как контекст профессионального образования // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – С. 232.
3. Чучалин А.И. модернизация инженерного образования на основе международных стандартов CDIO // Инженерное образование. – 2014. – № 16. – С. 14-29.
4. Никифоров В.И., Черненькая Л.В. Всемирная инициатива CDIO в российском образовании // Alma mater (Вестник высшей школы). – 2015. – № 3. – С. 8-12.
5. Веселов Г.Е., Лызь А.Е., Горбунов А.В. Концепция собственных образовательных стандартов и основных образовательных программ в области информационной безопасности в Южном федеральном университете // Научное обозрение. Педагогические науки. 2016. № 6. – С. 47–54.
6. Суркова Е.В. CDIO - современный подход к инженерному образованию // Электронное обучение в непрерывном образовании. – 2014. – Т. 1. – № 1 (1). – С. 156-162
7. Веселов Г.Е., Лызь А.Е., Горбунов А.В., Поликарпов С.В. Применение компетентностно-ориентированного подхода при проектировании фондов оценочных средств в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2016. – №6. – С.55-59.
8. Бродер Р., Малмквист Й., Эдстрем К., Кроули Э., Остlund С. Переосмысление инженерного образования. Подход CDIO. – М.: ВШЭ, 2015. – 540 с.
9. Петровская Т.С., Таюрская М.С. Опыт зарубежных вузов в организации проектно-внедренческой деятельности студентов на базовом уровне // Уровневая подготовка специалистов: государственные и международные стандарты инженерного образования . – Томск : Изд-во ТПУ , 2013 . – С. 16–18.
10. Кондратьев Э.В., Чемезов И.С. // Переход российского высшего образования на стандарты CDIO: содержание, перспективы, проблемы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2015. – № 3. – С. 41-50.

Котова Елена Евгеньевна, Потапова Вера Эдуардовна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЕБНОГО РЕСУРСА В СРЕДЕ LMS MOODLE

Аннотация. В данной работе рассматриваются этапы разработки учебного курса в среде LMS Moodle. Представлен метод повышения качества дистанционного обучения с помощью разработки функционального модуля управления структурированием электронного учебного ресурса на основе среды LMS Moodle.

Ключевые слова: дистанционное обучение, система дистанционного обучения, LMS, система управления обучением, Moodle, электронный учебный ресурс.

Annotation. This work describes the stages of development of a training course in the environment of LMS Moodle. The method of improving the quality of distance learning through the development of the functional control module structuring e-learning resource based on the LMS Moodle environment.

Keywords: distance learning, distance learning system, LMS, training management system, Moodle, electronic learning resource.

Введение. В современном мире смешанное (гибридное, интегрированное) обучение стало важной технологией в образовании. За последние 10-15 лет усовершенствовались информационные и интернет технологии. Многие специалисты доказывают эффективность технологии смешанного обучения. Например, «по заказу федерального департамента по образованию США специалисты Стэнфордского университета провели анализ более тысячи эмпирических исследований, в которых сравнивалось традиционное, онлайн и смешанное обучение» [1]. Результаты анализа позволили авторам утверждать, что в период с 1996 по 2008 год онлайн-обучение не имело значительного преимущества перед традиционными формами обучения. Однако смешанное обучение оказалось значительно эффективнее, чем обучение, полностью происходящее в режиме онлайн [2]. E-learning (электронное обучение) широко признается в качестве ценного и законного средства для гибкого обучения. Последующие разработки систем электронного обучения демонстрируют преимущества смешанного (гибридного, интегрированного) обучения, позволяющего совмещать компьютерное обучение, потенциал инструментов Web 2.0, online технологий с обучением в аудитории, т. н. face-to-face (F2F), «лицом к лицу».

Функциональные возможности систем электронного обучения. Использование "классического" понимания E-learning показывает, по крайней мере, три доминирующих подотрасли в электронном обучении: разработку контента, развитие авторских инструментов и разработку образовательных платформ (Content, Authoring tools, and E-Learning Platforms) [3].

Для поддержания такой формы обучения были разработаны немалое количество систем с различными функциональными возможностями.

Примеры развития систем приведены в таблице.

Таблица 1 – Примеры развития систем

Класс систем	Состав	Примеры
Авторские программные продукты, Authoring Packages, 90-е г.	Электронные материалы: инструкции, документы.	Articulate Storyline, Adapt Learning, др.
Системы управления контентом (Content Management Systems – CMS), 2000-е г.г.	Модульная архитектура системы, настраиваемый образовательный контент, интернет-ресурсы.	Joomla, WordPress, др.

Системы управления обучением (Learning Management Systems – LMS), 2000- е г.г	Средства организации учебной среды, административные инструменты, средства отчетности.	ATutor, Claroline, Dokeos, LAMS, Moodle , eFront, OLAT, OpenACS, Sakai, JoomlaLMS, др.
Системы управления учебным контентом (Learning Content Management Systems – LCMS)	Образовательные ресурсы: шаблоны, примеры учебных объектов. Форумы, чаты, веб-конференции.	
Системы следующего поколения электронного обучения (Next Generation Digital Learning Environment NGDLE)	Интеграция инструментов, методов, ресурсов, приложений в единой среде. Подход «сетевых LMS». Виртуальное учебное пространство. Интеграция адаптивных средств обучения, средств сотрудничества. Поддержка аналитики, персонализации программ обучения.	

Основные функциональные возможности систем следующего поколения электронного обучения должны ориентироваться и поддерживать: функциональную совместимость и интеграцию инструментов, обмен контентом и данными; персонализацию; аналитику, консультирование и оценку обучения; сотрудничество на различных уровнях; доступность и универсальный дизайн [4].

В России большинство вузов используют систему управления обучением класса LMS (LMS – learning management system) Moodle для поддержки электронного обучения. Moodle (Modular Object Oriented Dynamic Learning Environment) является модульной объектно-ориентированной динамической учебной средой (<https://moodle.org/>).

Поскольку структура Moodle является не жесткой, а гибкой, которая может адаптироваться к изменениям без каких-либо масштабных изменений, ее можно оптимизировать и расширять, разработав новые модули для решения ряда проблем, возникающих в процессе обучения, что является весьма актуальной задачей.

Одним важным преимуществом Moodle является широкая возможность для коммуникации: сервис рассылки позволяет быстро информировать всех участников обучения или отдельных групп о процессе и стадиях обучения.

Вопросы повышения качества профессионального образования получили новые возможности решения с развитием информационно-коммуникационных компьютерных технологий и LMS систем, с созданием и внедрением в учебную практику электронных учебных курсов (ЭУК) [5]. ЭУК представляет собой электронный учебный ресурс (ЭУР), соответствующий учебной дисциплине. ЭУР включает в себя все необходимые теоретические материалы, а также обучающие и контролирующие материалы.

Разработка курса обучения в LMS Moodle. Создание ЭУК и внедрения в него ЭУР в среде LMS Moodle процесс сложный и состоит из нескольких этапов, таких как:

- подготовка теоретических материалов курса;
- подготовка сценария курса;
- создание структуры курса в Moodle;
- настройка параметров курса;
- размещение материала в Moodle;
- создание учета пользователей;
- запись пользователей на курс.

Этапы создания курса в Moodle можно представить структурной схемой изображенной на рисунке 1.

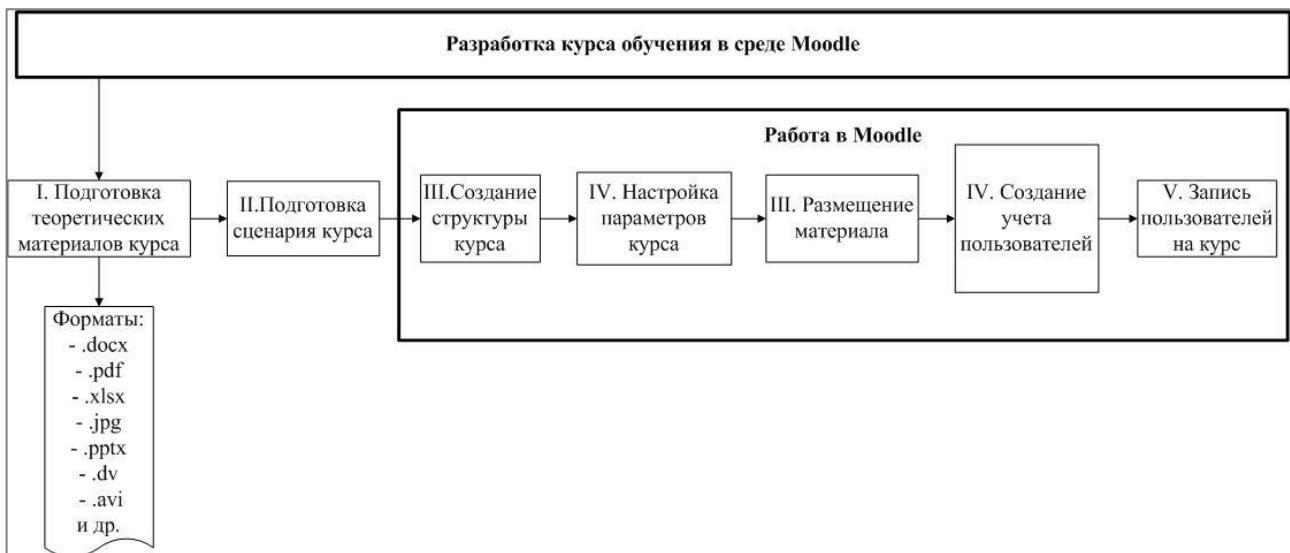


Рисунок 1. Функциональная схема создания курса обучения в Moodle

Moodle дает возможность проводить публикацию и разработку учебно- методических материалов в различных форматах: от текстового до мультимедийного. Имеются развитые возможности организации коммуникации между преподавателями и студентами, группами студентов, административных функций, контроля и проверки знаний студентов и т.д. Дистанционный учебный курс, разработанный в Moodle, может включать множество наборов различных элементов и ресурсов, например: веб-страницы, форумы, чаты, тесты, файлы, глоссарии, задания, лекции, хрестоматии, учебники, семинары, wiki, опросы, SCORM-пакеты и т.п. СДО Moodle может работать со следующими базами данных, в которых размещаются данные о процессе обучения: MSSQL, MySQL, PostgreSQL, Oracle, Access, Foxpro, но по умолчанию используется БД MySQL.

СДО Moodle построена с использованием трехзвенной архитектуры, является классическим клиент-серверным Web-приложением. Удобным использования для всех категорий пользователей системы и участвующих в учебном процессе делает использование в качестве клиента Moodle Web-браузера. На рисунке 2 изображена схема архитектуры объектно-ориентированной среды Moodle.

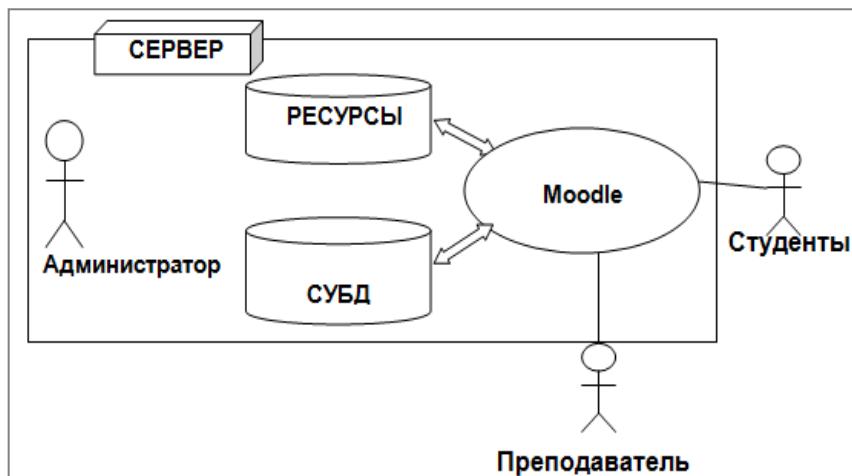


Рисунок 2 – Архитектура СДО Moodle

Размещение ЭУК в среде LMS дает возможность управлять учебным процессом студента, контролировать и оценивать качество обучения, но исходя из проведенного анализа и обзора используемых функциональных модулей в большинство LMS систем, по нашему мнению, недостаточно развиты функции аналитики процесса обучения, что требует разработки специального модуля.

Разработка модуля управления структурированием электронного ресурса.

Прогнозирование успеваемости учащихся и обеспечение активной обратной связи – основные задачи, связанные с областью аналитических исследований в области обучения (learning analytics) [6]. Обучающая аналитика основывается на исследованиях и методах многочисленных дисциплин, таких как интеллектуальный анализ данных, визуализация информации, психология и др. [7]. Изучение аналитики должно также служить основой для более глубоких, долгосрочных исследований условий, способствующих эффективному обучению [8]. Методы анализа и обработки данных дают возможность получить новые представления об обучении студентов и управлять процессом изучения курса.

Тот факт, что среда LMS Moodle распространяется с открытым исходным кодом, позволяет разрабатывать собственный функциональный модуль управления структурированием электронного ресурса с требуемыми функциональными требованиями:

- аналитики процесса обучения студента;
- формирования структуры ЭУР обучения как для группы обучающихся, так и индивидуально для студента.

Далее рассмотрим формирование модуля управления структурированием ЭУР в LMS Moodle на примере курса обучения «Инженерия знаний».

В системе управления обучением Moodle создается максимально полный курс «Инженерии знаний», содержащий множество материалов. Из полного курса по плану любого преподавателя с учетом программ дисциплин компонуется курс, например, ввиду ограниченности часов учебного плана, меньший по объему. На рисунке 3 представлен фрагмент тематической структуры полного курса «Инженерия знаний», который разделен на базовый курс и расширенный, где синим, выделены разделы расширенного курса.

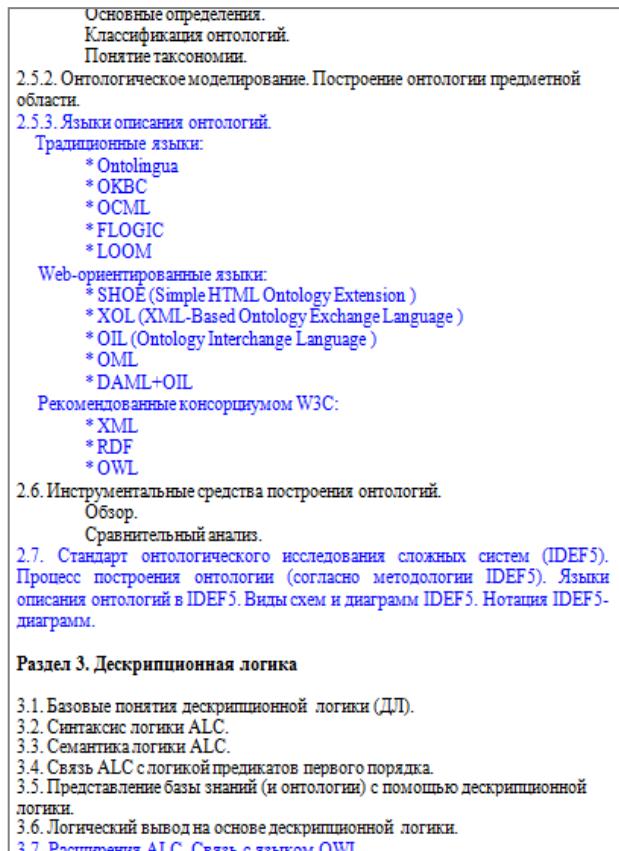


Рисунок 3 – Тематическая структура курса «Инженерия знаний (ИЗ)»

Также к материалу полного курса «ИЗ» создается дополнительный курс «Интеллектуальные информационные технологии. Методы инженерии знаний». Схема структуры курса, внедряемого в

LMS Moodle с разрабатываемым модулем управления структурированием ЭУР представлена на рисунке 4.

Если в блоке аналитики показывается, что у студента плохая успеваемость, то блок управления направляет его к изучению подготовительного материала. В другом случае, когда блок аналитики показывает среднюю и хорошую успеваемость, студент изучает курс по плану, т.е. базовый курс.

После того, как студент успешно сдаст все проверочные тесты базового курса, которые преподаватель поставил для каждого раздела (модуля), он может изучать расширенные и дополнительные материалы курса. То есть доступ к материалам изучаемого курса регулируется по успехам студента.

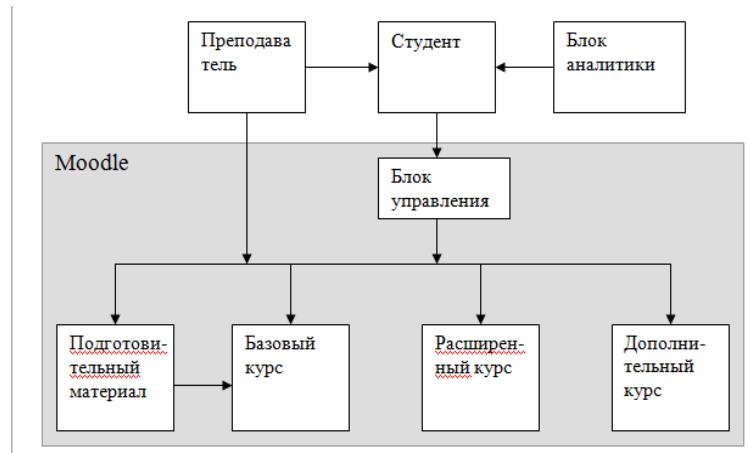


Рисунок 4 – Схема структуры курса

На рисунке 5 изображен макет интерфейса модуля управления профилями обучающихся. При выборе на панели «Администрирования» модуля открывается автоматически вкладка «Статистика прогресса обучения студента».

Эта страница представляет статистику уровня выполнения заданий студентом. С левой стороны матрицы визуализации статистики прогресса обучения (матрица располагается в центре страницы на рисунке 5) расположены все задания, заданные преподавателем, снизу номер студента по списку, цветом обозначены – уровень выполнения заданий. При нажатии на номер студента можно узнать рекомендации, сформированные из данных статистики. Пример представления активности студента изображен на рисунке 6.

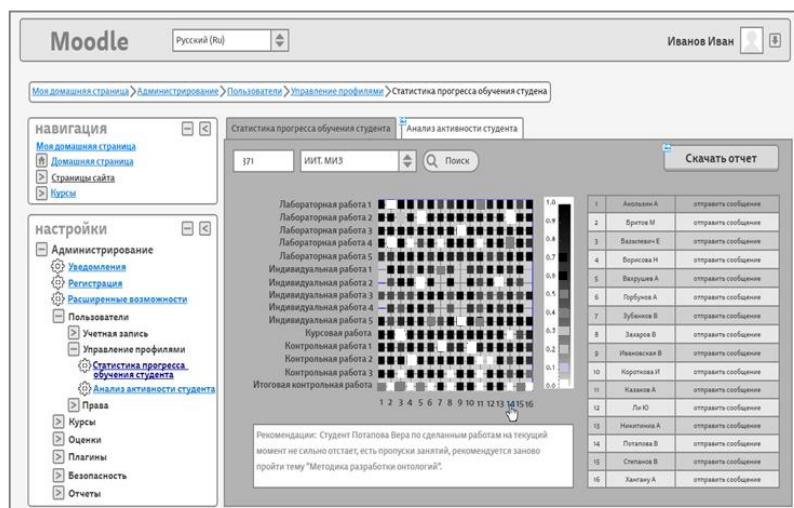


Рисунок 5 – Визуализация статистики обучения студента

The screenshot shows the Moodle 'Analysis of student activity' page. At the top right, it says 'Иванов Иван'. The main area displays a student profile for 'Вера Потапова' with a progress bar at 371. Below the profile, there's a section for 'Personal information' and 'Motivation for study'. On the right, there's a table for 'Elements of the course' and 'Number of points' with rows for forum activity, discussion activity, test scores, and a total of 85 points. A silver medal is awarded. Below this is a table for current levels and required point ranges for achievement, with rows for 0-65 (Bronze), 66-89 (Silver), and 90-100 (Gold). A button 'Change parameters' is at the bottom right.

Рисунок 6 – Визуализация представления активности студента

Можно просмотреть анализ активности отдельного студента с помощью функции поиска. На странице будут отображены полная информация о студенте, его аналитически подсчитанный показатель и уровень активности относительно деятельности студента в определенный период времени. У преподавателя имеется возможность изменить параметры текущего балльного диапазона для достижения какого-либо уровня и баллы за определенные действия студентов, рисунок 7.

This screenshot shows the same Moodle page as Figure 6, but with a modal dialog open. The dialog allows changing the parameters for achievement levels. It has four columns: 'Points' (Баллы), 'Level' (Уровни), 'Action' (Действия), and 'Points per action' (Баллы за одно действие). It lists three rows: '0-65' (Bronze) with 'Create forum' (Создать форум) and '10' points; '66-89' (Silver) with 'Commentary (correct answer to the question)' (Комментарий (корректный ответ на вопрос)) and '5' points; and '90-100' (Gold) with 'Correct answer to the question in the test' (Правильный ответ на вопрос в тесте) and '1' point. Buttons for 'Save' (Сохранить) and 'Cancel' (Отмена) are at the bottom. The background page remains the same as in Figure 6.

Рисунок 7 – Изменение параметров баллов активности

Заключение. Представлен модуль управления профилями обучающихся на основе анализа результатов прохождения курса обучения в системе LMS Moodle. Такой подход построения учебного процесса имеет ряд преимуществ, такие как, мониторинг процесса обучения студента, информирование студента о прохождении программы обучения, корректировка его траектории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексей Дьяченко, Евгений Цыганцов, Виктор Мяэотс Система дистанционного обучения Moodle// Библиотека материалов по ДО и Moodle [Электронный ресурс]. URL: <http://www.infoco.ru/mod/data/view.php?d=3&rid=154> (дата обращения 13.03.2017).
2. Means B. et al. Evaluation of evidence-based practices in online learning: A meta-analysis and review of online learning studies// US Department of Education [Электронный ресурс]. URL:

<https://www2.ed.gov/rschstat/eval/tech/evidence-based-practices/finalreport.pdf> (дата обращения 26.03.2017).

3. E-Learning Market Trends & Forecast 2014 - 2016 Report. Report by Docebo. March 2014. www.docebo.com

4. Retrieved from <http://www.ecampusnews.com/technologies/lms-digital-learning-271/2/>

5. Ребрина Ф. Г., Леонтьева И. А. Этапы разработки электронного учебного курса на платформе LMS MOODLE //Вестник Челябинского государственного педагогического университета. – 2014. – №. 2. С. 204-213.

6. Dawson S. et al. Current state and future trends: A citation network analysis of the learning analytics field //Proceedings of the fourth international conference on learning analytics and knowledge. – ACM, 2014. – Pp. 231-240.

7. Gašević D., Dawson S., Siemens G. Let's not forget: Learning analytics are about learning //TechTrends. – 2015. – V. 59. – №. 1. – Pp. 64-71.

8. Brown M., Dehoney J., Millichap N. The next generation digital learning environment //A Report on Research. ELI Paper. Louisville, CO: Educause April. – 2015.

К ПРОБЛЕМЕ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме мотивации научной деятельности аспирантов. Отмечается падение престижа научной деятельности в современном обществе, во многом обусловленное наличием противоречия между личными стремлениями молодых ученых и возможностями профессиональной самореализации в сложившихся условиях. В работе представлены результаты изучения ценностно-целевых ориентиров аспирантов с разной мотивацией научной деятельности, а так же содержательные особенности мотивации аспирантов с разной направленностью личности. Результаты исследования дают основание говорить, что направленность личности «на дело», подразумевающая заинтересованность в решении профессиональных задач и стремление к результативности выполняемой деятельности, способствует формированию внутренней мотивации научной деятельности, связанной с познавательными, творческими и профессиональными мотивами.

Ключевые слова: мотивация научной деятельности, профессиональные стремления, цели, направленность личности.

Annotation. The article is devoted to the actual problem of the scientific activity's motivation of graduate students. Reported the prestige of scientific activity in modern society, largely due to the contradiction between the personal strivings of young scientists and the opportunities for professional self-realization in the current circumstances. The paper presents the results of studying the goal-orientated targets of graduate students with different motivations for scientific activity, as well as the substantive features of the motivation of graduate students with different personality orientations. The results of the research give grounds to say that the person's orientation "on business", implying an interest in solving professional problems and striving for the effectiveness of the performed activity, contributes to the formation of internal motivation of scientific activity related to cognitive, creative and professional motives.

Keywords: scientific activity's motivation, professional strivings, goals, personality orientation.

Образовательные реформы последнего десятилетия, всеобщая коммерциализация вызвали ряд процессов в науке, которые напрямую связаны с ее качеством и эффективностью. Широко обсуждаются вопросы утраты научной школы. Еще в конце прошлого века российский методолог, психолог и социолог науки, А.В. Юрьевич, говорил о глубочайшем кризисе российской науки. Многочисленные опросы того времени показывали, что в глазах людей наука значительно утратила свой престиж. Кроме того, утрачивается и социальный заказ от общественности, и особенная романтическая атмосфера познания неизвестного [1]. Е. В. Семенов отмечает, что российская наука утратила социально значимые функции в собственном обществе и, как следствие, выпала из системы обмена деятельностью с другими сферами жизнедеятельности общества [2].

Если обратиться к современным реалиям, то можно обнаружить, что картина в целом изменилась слабо. Опросы молодых ученых, как будущих деятелей науки, и преподавателей высшей школы демонстрируют весьма пессимистичные взгляды. Говоря о трудностях профессиональной самореализации, аспиранты указывают на такие препятствия, как низкий уровень доходов и проблемы жилищного характера; продолжающийся кризис в науке и её неясные перспективы развития; падение престижа науки в обществе[3].

Такие условия создают довольно тяжелое положение для молодых ученых. Как показывают исследования, аспиранты имеют выраженную мотивацию самореализации, достижения и социального одобрения [4]. В результате, обнаруживается достаточно противоречивая ситуация: с одной стороны, молодые ученые ориентированы на достижение высоких результатов и получение социального признания; с другой – современные условия не позволяют реализовать указанные выше потребности, в результате чего ищутся возможности самореализации вне поля научной

деятельности. В таком случае остается открытым вопрос о месте науки в структуре ценностно-целевых ориентиров молодых ученых.

Цель исследования – изучение ценностно-целевых ориентиров аспирантов с разной мотивацией научной деятельности.

Личные стремления являются одним из конструктов, позволяющих проанализировать особенности ценностно-целевых ориентиров личности. Они отражают определенные мотивационные диспозиции, т.е. некоторые устойчивые характеристики направленности личности, которые организуют и конкретизируют мотивационную сферу. В силу этого основным предположением выступила гипотеза о том, что ценностно-целевые ориентиры аспирантов с внутренней мотивацией будут включать в себя стремления, связанные с научной деятельностью, а у аспирантов с внешней мотивацией научной деятельности таких стремлений не будет.

В ходе исследования были использованы следующие методики: «Мотивация научно-исследовательской деятельности» (МНИД) (Ю.С. Медведева, Т.В. Огородова), тест смысложизненных ориентаций (СЖО) (Д.А. Леонтьева), адаптированный вариант методики оценки личностных стремлений Р. Эммонса, «Ориентационная анкета» Б. Басса, морфологический тест жизненных ценностей В.Ф. Сопова и Л.В. Карпушиной, анкета, направленная на изучение мотивов научной деятельности аспирантов.

В исследовании приняли участие 92 аспиранта (52 мужчины, 40 женщин) Южного федерального университета, Кабардино-Балкарского государственного университета и Донского государственного технического университета, обучающиеся по различным специальностям. Возрастной диапазон участников исследования – от 24 лет до 31 года.

С целью содержательного изучения мотивации научной деятельности аспирантов, и, в частности, исследования вопроса влияния направленности личности на мотивацию НД аспирантов, исследуемая выборка была разделена на три подгруппы: имеющих направленность личности «на дело» – 35 человек (38,05% от всей выборки); «на себя» – 29 человек (31,52% от всей выборки) и «на общение» – 28 человек (30,43% от всей выборки).

В результате проведенного исследования было выявлено, что, профессиональная сфера, в которой осуществляется научная деятельность, имеет наиболее высокую значимость для аспирантов, направленных «на дело» и «на себя», однако, аспиранты, направленные «на дело», рассматривают профессиональную деятельность как возможность соединения работы и увлечения, творческого самовыражения, получения духовного удовлетворения, в то время как аспиранты, «направленные на себя» в профессиональной деятельности стремятся реализовать ценности эгоистически-престижного характера.

По результатам качественного анализа, мы можем утверждать, что для аспирантов, **ориентированных «на дело»**, в большей степени значимы духовно-нравственные ценности такие, как креативность, духовное удовлетворение и развитие себя, в совокупностью с высокой значимостью для них сферы увлечений, профессии и образования, мы можем говорить о преобладании стремления к профессиональному саморазвитию, причем профессия для них – это не только работа, но и увлечение, приносящее духовное удовлетворение, дающее возможность творить, что для них является наиболее важной ценностью. Несколько в меньшей степени, но, тем не менее, выражено стремление к достижениям и социальному взаимодействию, реализации своей социальной роли. Низкую значимость имеют ценности престижа и материального благополучия. В структуре мотивации научной деятельности аспирантов, направленных «на дело» наиболее выражены внутренние мотивы НД: познавательные и мотивы профессионального развития, потребности в творческой самореализации, являющиеся прямым следствием наиболее приоритетных ценностей. Присутствуют, но не имеют первостепенного значения, карьерные и материальные мотивы, релевантные возрастным задачам периода ранней взрослости. По результатам сравнительного анализа, мы можем констатировать, что аспиранты, направленные «на дело» в достоверно большей степени, по сравнению с аспирантами, направленными «на себя» и «на общение», ориентированы на профессиональное развитие, творческую самореализацию и познавательные мотивы в научной деятельности.

У аспирантов, **ориентированных «на себя»** в целом, в большей степени выражена значимость эгоистически-престижных ценностей, таких как собственных престижа и материальное благополучие, однако первое место по значимости занимает ценность развития себя, вероятно, рассматриваемая ими как средство достижения данных прагматических целей. Реализацию стремления к материальному благополучию и престижу аспиранты, направленные «на дело» планируют в профессиональной сфере, которая для них имеет большое значение, при этом стремление к получению духовного удовлетворения выражено в наименьшей степени, что, объясняется предпочтением материальных стимулов и стимулов престижа. Среди мотивов научной деятельности первое место занимают внешние мотивы НД: материальные, карьерные и мотивы социального одобрения, отражающие их главные ценности. Присутствуют, но не имеют первостепенного значения познавательные мотивы. Потребности в творческом самовыражении, в социальной полезности для аспирантов, направленных «на себя» имеют наименьшую степень выраженности. Проведенный сравнительный анализ показал, что аспиранты, направленные «на себя» в большей степени ориентированы на материальное благополучие, достижения, построение карьеры, по сравнению с аспирантами, направленными «на дело» и «на общение». Также было показано, что аспиранты, направленные «на себя» достоверно в большей степени, по сравнению с молодыми учеными, направленными «на дело» и «на общение», стремятся познанию и развитию своих способностей и их реализации, а также испытывают потребность в социальном одобрении. Аспиранты, **ориентированные «на общение»** в своей жизни и деятельности в большей степени ориентированы на ценности духовно-нравственного характера, главными из которых для них являются ценности социального взаимодействия и креативность, как возможность реализации своих творческих возможностей в стремлении изменить окружающую действительность. При этом значительную ценность имеет престиж, как стремление к получению признания общества. Стоит отметить, что обучение в аспирантуре связано для данных аспирантов не с профессиональной, а общественной самореализацией. Реализацию главных ценностей они связывают со сферами семьи и общественной жизни, которые являются приоритетными. В структуре мотивации научной деятельности главное место занимают внешние мотивы: коммуникативные, мотивы социальной полезности, однако, важное место занимает и потребность в творческом самовыражении, которая является отражением их главной жизненной ценности. Материальные и карьерные мотивы проявлены, но не играют главной роли. По результатам сравнительного анализа мы можем утверждать, что аспиранты, направленные «на общение», по сравнению с аспирантами, направленными «на дело» и «на себя» достоверно больше стремятся к реализации своих творческих способностей во всех сферах жизни, в том числе и в научной деятельности.

Результаты исследования дают основание говорить, что направленность личности «на дело», подразумевающая заинтересованность в решении профессиональных задач и стремление к результативности выполняемой деятельности, способствует формированию внутренней мотивации научной деятельности, связанной с познавательными, творческими и профессиональными мотивами; направленность личности, «на себя», отражающая стремление к вознаграждению, власти, соперничеству обуславливает стремление к саморазвитию, как средству достижения прагматических ценностей и способствует формированию внешней мотивации научной деятельности, в которой преобладают мотивы достижений, материальные, карьерные мотивы и мотивы социального одобрения; направленность личности «на общение», подразумевающая ориентацию на совместную деятельность, способствует формировании внешней мотивации научной деятельности, отражающей коммуникативные мотивы и стремление приносить пользу обществу, проявляя при этом высокий уровень креативности. Следовательно, ориентация личности «на дело» более релевантна научной деятельности, т.к. способствует формированию ее внутренней мотивации.

В целях изучения содержательной составляющей стремлений аспирантов была использована методика Р. Эммонса. Ответы, полученные с ее помощью, были распределены по 10 категориям: «Достижение» – стремления связанные с реализацией целей и получения результата, например такие стремления как «Достигать успеха», «Много зарабатывать» и т.д.; «Общение» – стремления, связанные с межличностным взаимодействием, например «Заводить новые знакомства», «Общаться

с интересными людьми» и т.д.; «Интимность» – стремления, связанные с близкими эмоциональными контактами и эмпатией, например, «Помогать другим людям», «Проводить время с близкими людьми» и т.д.; «Власть» – стремления, связанные с доминированием над другими людьми, например, «Научиться манипулировать людьми» и т.д.; «Личностный рост и здоровье» – стремления, связанные с саморазвитием и благополучием, например, «Получать новые знания», «Вести здоровый образ жизни» и т.д.; «Преподнесение себя» – стремления, связанные с получением социального одобрения, например, «Быть красивым» и т.д.; «Независимость» – стремления, связанные с достижением независимости и самоутверждением, например, «Обрести материальную независимость» и т.д.; «Саморазрушение/дезадаптация» – стремления, связанные с избеганием возможностей, ведущих к личностному развитию, например, «Много отдыхать» и т.д.; «Творчество» – стремления, связанные с творческой продуктивностью и желанием быть полезным для общества, например, «Передавать накопленный опыт», «Создавать новое» и т.д.; «Самотрансценденция» – стремления, связанные с духовностью и универсализмом, например, «Быть в гармонии с природой» и т.д.

Сразу стоит отметить, что ни одним аспирантом не были названы стремления, напрямую имеющие отношение к научной деятельности.

Большая часть стремлений аспирантов относится к категориям «Достижение», «Общение», «Интимность» и «Личностный рост и здоровье». Это отражает их возрастные особенности, характеризующиеся выраженной мотивацией достижения, самореализации и социальной активности.

В результате анализа полученных данных, выяснилось, что аспиранты с внешней мотивацией склонны чаще указывать стремления, связанные с достижением и планированием целей и материальным благополучием. Это согласуется с общей точкой зрения касательно того, что люди с внешней мотивацией ориентированы скорее на результат своей деятельности, но не на её процесс. При этом аспиранты с внутренней мотивацией склонны в большей степени оценивать свои стремления в этой категории как более трудные. Аспиранты с внутренней мотивацией научной деятельности в большей степени ориентированы на глубокое и эмоциональное взаимодействие в межличностной сфере, в том время как аспирантам с внешней мотивацией научной деятельности характерно стремление к поверхностному взаимодействию. Это можно объяснить тем, что внешняя мотивация характеризуется pragmatичностью, что также отражается и в социальной сфере.

Кроме того, у молодых ученых с внутренней мотивацией научной деятельности стремления, связанные с саморазвитием, занимают более значительное место в мотивационной структуре, нежели у аспирантов с внешней мотивацией научной деятельности, что подтверждают другие исследования, согласно которым внутренняя мотивация связана с саморазвитием.

Стоит отметить, что корреляционный анализ не показал прямой взаимосвязи между мотивами научной деятельности и соответствующими стремлениями. Это говорит о том, что существует рассогласованность между мотивами и целями, что, в свою очередь, указывает на то, что научная деятельность в данном случае выступает средством достижения целей, не имеющих прямого отношения к науке.

Отсутствие стремлений, напрямую связанных с научной деятельностью подтверждает, что степень личностной вовлеченности в процесс научной деятельности относительно невысокий, что в очередной раз демонстрирует противоречивость мотивационной сферы и ценностно-целевых ориентаций ученых в современных условиях и подтверждает актуальность изучения этого вопроса.

В результате получается, что современный молодой ученый с внутренней мотивацией НД ценит свою профессию, стремится к саморазвитию, но именно в профессиональной сфере, не научной. Наука тут скорее выступает средством повышения квалификации и достижения целей саморазвития, но не самоцелью.

Учитывая современную экономическую ситуацию, когда в результате вводимых Западом санкций, развитие наукоемкого производства в стране стало одной из первостепенных задач, необходимость повышения престижа научной деятельности становится все более актуальной. Здесь возникает вопрос о том, как сделать так, чтобы наука стала самоцелью для молодого ученого? Проведенное исследование показывает, что мало развивать внутреннюю мотивацию научной

деятельности аспирантов, необходимо чтобы была согласованность между стремлениями и мотивами, целями личности. А вопрос «возвращивания», развития этой согласованности лежит не только в поле материального: решения бытовых вопросов и обеспечения достойного уровня заработных плат, но и психологического. Одним из возможных решений данной задачи видится создание инновационной образовательной среды, пронизывающей все ступени образования: от начальной школы до вуза. Необходимо, чтобы в условиях общеобразовательной школы дети не утрачивали природную любознательность, а развивали ее, чтобы каждый ребенок мог почувствовать себя первооткрывателем. Следует выявлять на ранних стадиях склонность к исследовательской деятельности, поддерживать и развивать ее в детских кружках научного творчества, продолжать совершенствовать в студенческих научных объединениях. Создание подобного рода преемственных научных связей будет способствовать тому, что наука станет частью жизни будущих ученых, а не средством достижения других целей. Понимание содержательных особенностей мотивации научной деятельности и их учет в работе с аспирантами могут быть использованы в качестве теоретической и практической основы для совершенствования научно-исследовательской работы вуза

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьевич А.В. Умные, но бедные: ученые в современной России. — М.: МОНФ, 1998. — 201 с.
2. Семёнов Е.В. Человеческий капитал в российской науке. Информационное общество. — 2008. № 1-2. — С. 106-123.
3. Аблажей А.М. Научная карьера в представлениях у студентов и аспирантов. Факторы выбора и критерии успеха. Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Философия. — 2006. Т. 4. № 2. — С. 98-104.
4. Мазалецкая А.Л. Динамика мотивации научно-исследовательской деятельности на этапах профессионализации. Автореферат на соискание кандидата психологических наук. Ярославль, 2011.

ПЕРЕХОД К НОВЫМ МОДЕЛЯМ ОБРАЗОВАНИЯ В ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРОВ

Аннотация. Статья посвящена проблеме перехода к новым моделям инженерного образования: «Образованию 2.0» и «Образованию 3.0». В ней раскрыт образ инженера-профессионала, дана характеристика новых образовательных моделей, показаны ограничения информационных образовательных технологий. Сделан вывод о том, что реализация новых моделей образования во многом базируется на информационных технологиях, однако это не снижает значимости проектных, интерактивных, личностно-развивающих образовательных технологий, которые обеспечивают «живое» взаимодействие обучающих и обучающихся.

Ключевые слова: Инженерное образование, «Образование 2.0», информационные образовательные технологии, личностно-развивающие технологии.

Annotation. The article is devoted to the problem of transition to new models of engineering education: "Education 2.0" and "Education 3.0". It reveals the image of a professional engineer, describes new educational models, shows the limitations of information educational technologies. The implementation of new models of education is largely based on information technologies, but this does not reduce the importance of design, interactive, personal-development educational technologies that provide a "live" interaction of teachers and students.

Keywords: Engineering education, "Education 2.0", information educational technologies, personal-development technologies.

Развивающееся общество и производство оказывают влияние на инженерную деятельность, изменяют требования к инженеру-профессионалу. Помимо функциональности специалиста и готовности к прикладным видам деятельности (проектно-конструкторской, производственно-технологической, монтажно-наладочной, сервисно-эксплуатационной и др.) большое внимание уделяется нетехническим – интеллектуальным, метакогнитивным и социально-личностным компетенциям инженера [5]. Отечественные и зарубежные исследователи указывают следующие характеристики компетентного инженера [6]:

- владение современной методологией осмыслиения действительности, гибкость и многогранность научного мышления;
- умение решать проблемы, мыслить интегративно и глобально, критически и творчески;
- владение иностранными языками, информационными технологиями, методами компьютерного моделирования, технологиями обеспечения безопасности и технологиями дизайна, вопросами экономики, менеджмента, интеллектуальной собственности, социально-культурного «конструирования»;
- мобильность специалиста, возможность перехода от одного вида профессиональной деятельности к другому;
- способность к адаптации в современном глобальном мире, умение реагировать на происходящие перемены;
- навыки самооценки, умение обучаться на протяжении всей жизни, способность к самообразованию и саморазвитию в условиях постоянно изменяющихся технологий;
- коммуникативные умения, навыки межличностного общения и работы в команде (эмпатия, способность выстраивать позитивные взаимоотношения, преодолевать конфликты).

Тенденции развития общества и новый образ инженера-профессионала требуют построения новой системы инженерного образования: пересмотра организационно-экономических механизмов, поиска новых форм взаимодействия образования, науки и производства, развития инфраструктуры и учебно-лабораторной базы, внедрения перспективных организационных форматов и образовательных технологий [1].

Проектные, интерактивные, информационные, личностно-развивающие образовательные технологии получают все большее распространение в высшем образовании, поскольку позволяют ориентировать процесс обучения на компетентностные результаты, обеспечивать направленность не только на знания и умения, но и на личностные ресурсы профессионального развития [6]. Эти технологии характерны современной образовательной реальности, они достаточно инвариантны, чтобы сохраняться и в будущем. Однако развитие информационной цивилизации позволяет ожидать существенные изменения в инженерном образовании. Тенденции его развития можно проследить через сопоставление так называемых моделей образования 1.0, 2.0 и 3.0.

Традиционная модель «Образование 1.0» предполагает трансляцию знаний и умений, наличие нескольких учеников и одного учителя, которые представляют два разных уровня. При этом взаимодействие между учениками практически отсутствует, а коммуникация между уровнями осложнена. Электронное обучение «Е-обучение 1.0» – традиционное электронное обучение с использованием компьютера (проектора, интерактивной доски и пр.), предполагает один источник и несколько получателей информации. Использование компьютера добавляет наглядность к традиционным характеристикам учебной деятельности, но не меняет модели обучения 1.0 и отношений учитель-ученик [9].

«Образование 1.5» является промежуточной моделью и включает те же уровни (один учитель и несколько учеников) с добавлением горизонтальной коммуникации на уровне учеников. Здесь начинают проявляться новые характеристики: обучение в группе, взаимопомощь, интерактивный характер – возможность выполнять роль и ученика, и учителя для других учеников. «Е-обучение 1.5» вносит изменения в горизонтальную коммуникацию, реализующуюся с помощью форумов, чатов, обсуждений группы, поддержания обратной связи с учителем. Электронное обучение позволяет увеличивать скорость распространения информации и сокращать время реагирования [9].

Модель «Образование 2.0» представляет собой обучение в группе, где каждый является специалистом в каком-либо вопросе и хочет узнать нечто новое. Здесь под руководством учителя организуются сообщества по интересам / целям, каждый участвует в производстве контента, каждый может быть учителем и учеником одновременно. Появляются такие характеристики, как свобода выбора, взаимопомощь, самопроизводство и самопотребление информации, быстрая коммуникация и распространение информации, возможность индивидуального обучения [9]. Именно эта модель в настоящее время служит ориентиром совершенствования высшего образования.

В будущем прогнозируется переход к модели «Образование 3.0», которое сохраняет те же тенденции, но усиливает самоорганизацию, почти нивелируя управляющую роль педагога. Возрастает роль самостоятельного выбора и самоуправления студентов, являющихся производителями содержания обучения и организаторами собственного образования [2].

По предложению К.В. Сапегина модель «Образование 3.0» базируется на следующих принципах [9]:

- принцип «Торрента» – равный обмен информацией.
- принцип «Социальной сети» – организация широкой сети контактов по функциональному признаку (хобби, решение задачи).
- принцип «Твиттера» – короткая, емкая информация с возможностью раскрыть тему при необходимости.
- принцип «Блога» – обучение через личный опыт и практику.
- принцип «Вики» – возможность дополнить и откорректировать информацию.
- принцип «Поисковика» – легкий доступ к необходимой информации.
- принцип «Комментов» – возможность видеть оценку информации другими членами сообщества.

Образование 3.0. изменяет не только роли студентов и их работу со знаниями, но и организационные форматы (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики образования 1.0, 2.0, 3.0 в высшей школе [10]

Характеристики	Образование 1.0	Образование 2.0	Образование 3.0
Главная роль профессора	Источник знаний	Руководство и источник знаний	Руководитель создания совместных знаний
Соглашения о содержании	Традиционные авторские материалы	Авторское право и открытые образовательные ресурсы для студентов в рамках дисциплины, редко межуниверситетские	Бесплатные / открытые образовательные ресурсы, создаваемые студентами во многих вузах, дополненные оригинальными материалами
Учебная деятельность	Традиционная, эссе, задания, тесты, некоторая групповая работа в аудитории	Более открытые технологии; усиление сотрудничества в учебной деятельности, ограниченной институциональными и аудиторными границами	Открытая, гибкая учебная деятельность, возможности для студенческого творчества; социальные сети за пределами традиционных границ дисциплины, учреждения, страны
Институциональные механизмы	Принадлежность студентов к университету, проводящем обучение и оценку	Принадлежность студентов к одному университету; увеличение сотрудничества между университетами	Свободные отношения и принадлежность студентов к разным организациям; распад региональных и институциональных границ
Деятельность студентов	Во многом пассивное усвоение того, что предлагается преподавателями	От пассивного к активному усвоению, формирующему чувство сопричастности к образованию	Реализация собственной причастности к образованию, созданию ресурсов и возможностей, активный выбор

В свете этих тенденций происходит усиление роли информационных образовательных технологий в инженерном образовании. Так, участники Всемирного форума по инженерному образованию, прошедшего в Дубае в 2014 г., отметили, что произошел эффект «разрушения стен аудиторий» [3]. Опыт использования информационных и дистанционных технологий во многих университетах мира показывает, что они способны улучшать преподавание за счет проработки методик и выстраивания учебного контента. Инструментами университетского образования и необходимой платформой для подготовки инновационно-ориентированных инженеров становятся Массовые открытые онлайн-курсы (в основном для теоретического обучения) и виртуальные лаборатории (для практического освоения курсов и формирования навыков). Новые технологии дают возможность создавать совместные «игровые площадки» для инженеров, предоставляют возможности командной работы над единым проектом представителей разных стран и национальностей. При этом для самих студентов по-прежнему чрезвычайно важным остается живое человеческое общение с преподавателем [3].

Цифровизация образования изменяет отношения в системе «преподаватель-студент», сокращает процесс непосредственного общения, обладающего мотивирующим и вовлекающим потенциалом; формирует «искусство компиляции», основанное на клиповом мышлении, ограничивая возможности творческого усвоения и индивидуальной переработки поступающей информации [4]. Растущая технократизация образовательного процесса, минимизация прямого диалога преподавателя и студента за счет внедрения новых технологий обучения, в том числе компьютерных, дистанционного обучения, внедрения в практикоориентированную компоненту

образовательного процесса 3D-принтеров и виртуального моделирования повышают вероятность дегуманизации образования [8]. В связи с необходимостью компенсировать безличную сущность технологии в образовании следует продвигаться от узких специалистов к «фундаменталистам», способным адаптироваться к новой информационной технике, легко ориентироваться в лавинообразно разрастающемся потоке информации, следует культивировать человеческое, стремиться к взаимопониманию, формировать новую картину цивилизации [7].

Переход к новым моделям образования, основанным на информационных технологиях, необходимо осуществлять совместно с расширением использования личностно-развивающих образовательных технологий. Это обусловлено следующим [4]:

– необходимостью развивать способности обучающихся самостоятельно находить информацию, анализировать и интерпретировать ее, приобретать знания и развивать умения их получения;

– неоднозначным влиянием информационных технологий на развитие личности, необходимостью компенсировать их «деформирующее» воздействие;

– важной ролью личностной позиции, мотивации и ресурсов самоуправления для действий в информационно насыщенной среде, в условиях практически неограниченного доступа к информации.

Эйфория относительно универсальности и революционности методов дистанционного и цифрового обучения все больше уступает место убеждению в том, что виртуальные технологии являются лишь прикладным инструментом для решения образовательных задач, что общение с преподавателем исключить невозможно и, следовательно, нужно соблюдать разумный баланс между цифровым и традиционным обучением [3].

Итак, новые модели образования, более адекватные задаче подготовки компетентного инженера, актуализируют самообразование студентов и изменяют роли преподавателей и студентов. Они основаны на развитии информационных и коммуникационных технологий, расширении виртуального образовательного пространства, а также на готовности студентов использовать эти возможности для производства собственных знаний и интеллектуально-творческих продуктов, организации своего образования и саморазвития. Несмотря на то, что реализация образования 2.0 и 3.0 во многом базируется на информационных технологиях, это не снижает значимости проектных, интерактивных, личностно-развивающих и других образовательных технологий, которые обеспечивают «живое» взаимодействие обучающих и обучающихся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселов Г.Е., Лызь Н.А., Лызь А.Е. Построение будущего: опыт поэтапного совершенствования инженерного образования // Высшее образование в России. 2017. №5. С. 15-22.
2. Голицына И.Н. Технология Образование 3.0 в современном учебном процессе // Образовательные технологии и общество. 2014. Т. 17. № 3. С. 646–656.
3. Иванов В.Г., Похолков Ю.П., Кайбияйнен А.А., Зиятдинова Ю.Н. Пути развития инженерного образования: позиция глобального сообщества // Высшее образование в России. 2015. № 3. С. 67–79.
4. Лызь А.Е. О необходимости личностно-развивающих образовательных технологий в новой информационной среде // Безопасность и развитие личности в образовании / Материалы III-й Всероссийской научно-практической конференции (г. Таганрог, 19-21 мая 2016 г.). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. –С. 219–223.
5. Лызь Н.А., Лызь А.Е., Нещадим И.О. Личность профессионала как целевой ориентир высшей технической школы // Вестник ВГУ. Серия: Проблемы высшего образования. 2016. №3. С. 47–51.
6. Лызь Н.А., Лызь А.Е. Управление личностными ресурсами: образование и профессиональное развитие: учебное пособие. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2016. – 136 с.

7. Малькова Т.П. Информационное общество: тенденции развития образования // Мир образования – образование в мире. 2013. № 1. С. 99–106.
8. Перевозчикова Л.С., Радугин А.А. Вызовы и риски института высшего образования в культуре современного общества // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Проблемы высшего образования. 2014. №2. С. 18–21.
9. Сапегин К.В. Образование 1.0, 2.0, 3.0: миф и реальность [Электронный ресурс]. URL: http://ioc.rybadm.ru/project/s_17_01_13/obrazovanie.pdf
10. Keats D., Schmidt J. Ph. The genesis and emergence of Education 3.0 in higher education and its potential for Africa // First Monday. 2007. V. 12. №3.