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

IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»

Сборник научных работ

п. Нижний Архыз, Россия
24–27 сентября 2019 г.

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2019

УДК 681.51.033(06)
ББК 32.965
С34

Программный комитет:

Балега Ю.Ю., САО РАН
Колесников А.А., Южный федеральный университет
Веселов Г.Е., Южный федеральный университет
Власюк В.В., САО РАН
Першин И.М., Северо-Кавказский федеральный университет
Аракелов А.В., Адыгейский государственный университет
Ачарова И.А., Южный федеральный университет
Гузик В.Ф., Южный федеральный университет
Доргушарова А.К., Майкопский государственный технологический университет
Душин С.Е., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
Желенкова О.П., САО РАН
Кайсина Е.И., САО РАН
Ляпунцова Е.В., Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Первухин Д.А., Санкт-Петербургский горный университет
Попов А.Н., Южный федеральный университет
Самойлов А.Н., Южный федеральный университет
Уткин В.А., Институт проблем управления РАН
Чернышев А.Б., Северо-Кавказский федеральный университет
Шайлиев Р.Ш., Северо-Кавказская государственная академия

С34 IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов (п. Нижний Архыз, Россия 24–27 сентября 2019 г.); Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2019. – 589 с.
ISBN 978-5-9275-3228-5

Сборник состоит из трудов IX-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2019), 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.

Публикуется в авторской редакции.

УДК 681.51.033(06)
ББК32.965

ISBN 978-5-9275-3228-5

© Южный федеральный университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. **ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**.....8

Колесников А.А.
Проблемы системного синтеза: синергетическая концепция.....8

Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е., Подольцев В.В.
Синергетическая парадигма управления процессами обработки на станках 19

Веселов Г.Е., Скляров А.А.
Современные методы синтеза систем группового управления мобильными роботами.....30

Попов А.Н.
Синергетический синтез регуляторов для систем векторного управления асинхронным двигателем электромобился 41

Кузьменко А.А. Сравнение методов робастного управления нелинейными системами: интегральная адаптация и скользящее управление 51

Французова Г.А.
Применение скользящих режимов в системах автоматической оптимизации 62

Душин С.Е., Шпаковская И.И.
Моделирование процессов биосорбционной очистки сточных вод 70

Обухова Е.Н.
Синтез нелинейных синергетических законов управления пневматической системой 80

Олейников К.А.
Синергетическое управление системой мотор-колесо-дорожное покрытие электромобиля...90

Межаков О.Г.
Трехфазный двунаправленный преобразователь напряжения подвижных платформ.....102

Подоплёкин Ю.Ф., Шаров С.Н.
Основные проблемы посадки беспилотных летательных аппаратов на маломерные суда....109

Чубукин А.В., Целигоров Н.А., Целигорова Е.Н.
Синтез цифровой робастной системы управления асинхронным электроприводом.....114

Брикова О.И., Грудяева Е.К., Душин С.Е.
Исследование влияния температуры окружающей среды на процессы биологической очистки в однозонном реакторе.....121

Романов С.А.
Алгоритм численной проверки критерия положительной инвариантности для класса нелинейных систем 129

Якименко О.И., Колесников А.А., Калий Д.С.
Синергетическая система управления автономным приводным аппаратом, компенсирующая внешние возмущающие воздействия. 136

Инагбире А.
Метод синергетического синтеза законов управления беспилотными летательными аппаратами в условиях ветровых возмущений 143

Синицын А.С.
Нелинейный синтез астатической системы управления гидравлической подвеской автомобиля.....155

II. **ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ** 166

Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Якопов Г.В., Верич Ю.Б., Емельянов Э.В., Сачков М.Е., Согоян А.Е., Марченко Д.В.
О развитии астрономических наблюдений с высоким спектральным разрешением 166

Москвитин А.С., Комаров В.В., Комарова В.Н., Емельянов Э.В.
Астрономические наблюдения на 1м оптическом телескопе ЦЕЙСС-1000 САО РАН..... 170

Панчук В.Е., Клочкова В.Г.
К проблеме наземных астрономических наблюдений с высоким спектральным разрешением..... 176

Комаров В.В.
Инженерное обеспечение астрономических наблюдений на оптических телескопах САО РАН 181

Ачарова И.А., Балашова А.А.
Анализ особенностей распределения содержания различных химических элементов по радиусу диска Галактики 189

Ачарова И.А., Воротилина С.С.
Моделирование формирования и эволюции Галактики 198

Желенкова О.П., Витковский В.В., Черненков В.Н., Ягодка С.А., Пляскина Т.А., Шергин В.С., Малькова Г.А., Величко А.М.
Прототип программно-определяемого хранилища для архива цифровых коллекций..... 204

Черненков В.Н.
IPv6 – как средство самоорганизации локальных сетей САО РАН. 214

Емельянов Э.В., Фатхуллин Т.А.
MMPP — multi-mode photometer-polarimeter. Оптическая схема и система управления прибором. 223

III. **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ...**229

Сафиуллин Р.Н., Резниченко В.В., Морозов Е.В.
Теоретические аспекты развития систем управления энергетическими ресурсами интеллектуальных технических комплексов 229

Мунтян Е.Р.
Особенности использования графов при моделировании сложных технических систем 235

Колпащиков С.А., Данилушкин И.А.
Опыт разработки компьютерного тренажера оператора технологического процесса 241

Немудрук М.Л., Федоров М.С., Шпаковская И.И.
Диагностирование кавитационных режимов в системах перекачки темных нефтепродуктов249

Богданова М.С., Ляшенко А.Л.
Разработка устройства автоматического регулирования температуры 257

Светлов М.С.
Теория кодирования: классика и модерн 263

Кленов Д.В., Львов А.А., Львов П.А., Светлов М.С., Светлова М.К.
Оценка достоверности приёмопередачи для моделей информационных каналов повышенной помехоустойчивости 274

Шаров С.Н., Соловьева В.В.
Синтез и обработка сложных локационных сигналов.....285

Цимбал В.А.
Приложение конечных марковских цепей к анализу и синтезу сетей передачи данных 293

Обухов П.С., Ивлиев Е.А., Ивлиев В.А.
Система идентификация и визуализация информации о багаже в аэропорту 303

Клименко И.С.
Модели интеллектуальной системы управления безопасностью объекта информатизации на основе метода экспертных оценок 308

Гребенников А.С., Гребенников С.А., Кедрова Е.Н.
Кинетические особенности коррозии кузовных элементов автомобилей.....315

Елькин Д.М., Вяткин В.В.
Обзор существующих подходов к управлению транспортными потоками: Многоагентные системы в концепции интернета вещей 323

Обухов П.С., Веремеев Д.Н.
Алгоритм определения необходимой и достаточной структуры искуственной нейрнной сети 330

Поленов М.Ю., Курмалеев А.О., Пуховский В.Н.
Интеллектуальные средства для повторного использования моделей.....335

Гушанский С.М., Потапов В.С.
Методика квантового распознавания изображений и объектов.....341

Самойлов А.Н., Кучерова М.С., Сергеев Н.Е.
Подход к получению цифровых изображений высокого разрешения с помощью камеры мобильного устройства.....346

IV. **УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**...352

Першин И.М., Веселов Г.Е., Малков А.В., Першин М.И.
Коррекция дискретных математических моделей распределенных объектов.....352

Коваль В.А., Торгашова О.Ю., Соломин М.А.
Разработка системы стабилизации температуры в теплообменном аппарате 365

Першин И.М., Русак С.Н., Цаплева В.В.
Оценка влияния шага дискретизации математических моделей распределенных объектов на динамические характеристики.....376

Статкевич А.В., Ляшенко А.Л.
Разработка системы управления микроклимата на базе ARDUINO.....384

Чернышев А.Б., Половинко Е.В.
Устойчивость распределенных автоколебательных ситсем 393

Санкин А.В., Алтухов В.И., Сигов А.С.
Технология управления процессом получения гетероструктур и расчет высоты барьера диодов Шоттки на основе 4H-SiC и его твердых растворов.....401

Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Першин И.М., Сирота Д.Д.
Компьютерное моделирование двумерной неустановившейся фильтрации газа с учетом интерференции скважин.....409

Хаджиев А.А.
Моделирование системы управления при теплоснабжении жилых помещений 417

Абрамкин С.Е., Душин С.Е.
Управление технологическими процессами газодобывающих комплексов 430

Ильюшин Ю.В.
Автоматизация технологического процесса добычи высокопарафинестой нефти с помощью импульсной распределенной системы управления 440

Антропова В.В., Трушников Д.А.
Создание пространственно распределенных математических моделей нефтегазоносных пластов сложной формы 447

Першин И.М., Кухарова Т.В., Папуш Е.Г., Спивак А.О.
Построение распределённой аппроксимационной модели гидролитосферных процессов железноводского месторождения минеральных вод 453

Асадулаги М.-А.М.
Проектирование сосредоточенного и распределенного регулятора для управления гидролитосферным процессом 461

Дилигенская А.Н.
Методы параметрической оптимизации в задачах идентификации теплофизических систем470

V. **СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ** 477

Кондрашкова Г.А., Бондаренкова И.В., Сидельников В.И.
Синергетический подход к развитию современного образования 477

Веселов Г.Е., Лызь А.Е., Лызь Н.А.
Факторы эффективности проектного обучения в подготовке инженеров 483

Бондаренкова И.В., Черникова А.В.
Разработка образовательных программ высшего образования с учетом интеграционных процессов 488

Кибальченко И.А., Дудко С.А., Угреватова Т.А., Онищенко М.В., Чумичев В.С.
Разработка диагностических текстов в учебном процессе: технологический способ развития понятийного мышления будущих инженеров 495

Лызь Н.А., Истратова О.Н.
Процессуальная модель информационно-образовательной деятельности обучающихся 500

Эксакусто Т.В., Кибальченко И.А.
Развитие интеллектуально-личностного ресурса будущих IT-специалистов в условиях метапредметных образовательных технологий 508

Плёнкин А.П., Федотова А.Ю., Познина Н.А., Самойленко В.С.
Практика внедрения проектной деятельности 517

Горбатюк В.Ф.
Некоторые особенности авторской технологии обучения 525

Горбунов А.В., Лызь А.Е.
Разработка системы оценивания результатов проектной деятельности в соответствии с требованиями стандартов CDIO 525

VI. **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ** 544

Битюцкая Н.И., Битюцкий А.О.
Анализ методов и программных продуктов для прогнозирования социально-экономического развития регионов РФ 544

Вартумян А.А.
Геополитика транспортных артерий на Юге России: технологические решения и политический расчет.....552

Чудин А.А.
Парадигма устойчивого развития России и мира на основе целостного геотрионного синергетического подхода.....558

Светлов. М.С., Львов А.А., Кленов Д.В., Мищенко Д.А. , Багаев И.С., Светлова М.К.
Информационные каналы с адаптивным управлением.....558

Добрынин М.Е., Львов П.А., Ивженко С.П., Ясюк Н.А., Светлова Э.М., Шпрехер М.И.
Исследование влияния температурных эффектов на работу пьезорезистивного датчика давления 558

I. ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-8-18

Колесников Анатолий Аркадьевич

Южный федеральный университет

ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМНОГО СИНТЕЗА: СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ.

Аннотация. *Российская наука и высшее образование уже более 10 лет находятся в процессе реформирования. С одной стороны, имеются выдающиеся достижения и успехи, а с другой – жизнь мчит вперед, берет разгон XXI век, интенсивно идет становление постиндустриального информационного общества... На основе какой единой концепции формировать у молодого специалиста и ученого целостный взгляд на мир? Что является гносеологической базой современной системы знаний? Что представляет собой междисциплинарный подход? Эти темы исследует автор статьи.*

Ключевые слова: *Синергетика, кибернетика, метод АКАР, инвариантное многообразие, синергетическая теория управления.*

Annotation

Russian science and higher education have been in the process of reform for over 10 years. On the one hand, there are outstanding achievements and successes, but on the other hand, life rushes forward, takes on the twenty-first century, accelerates the formation of a post-industrial information society ... Based on what uniform concept to form a young specialist and scientist with a holistic view of the world? What is the epistemological base of the modern system of knowledge? What is an interdisciplinary approach? These topics are investigated by the author of the article.

Keywords: *Synergetics, cybernetics, ADAR method, invariant manifold, synergetic control theory.*

Часть 1 Кибернетика и синергетика: концептуальный альянс

О РЕДУКЦИОНИЗМЕ И СИНЕРГЕТИКЕ

В наше время все в большей мере проявляется кризис технократического мышления, который связан с фундаментальными основами современного мировоззрения. Он непременное звено в общем цивилизационном кризисе науки и общества конца XX – начала XXI в. и во многом обусловлен отчуждением естественно–технической и гуманитарной составляющих науки как частей культуры в целом. Неизбежным следствием этого кризиса является фрагментарность в понимании окружающего мира, неадекватность реакции на разрушительные тенденции в современном мироустройстве и нарастающие угрозы экологического, техногенного и, можно сказать, общесистемного характера.

В основе научно-фундаментальных знаний лежит, как известно, та научная картина мира, которая формируется в процессе изучения принятой базовой концепции естествознания. Существовавшая до настоящего времени научная картина мира опиралась в основном на классический редукционистский подход, согласно которому окружающие нас природные явления состоят из мира вещей и мира законов. Такое представление означает, что свойства целого объясняются свойствами частного, то есть характеристики целого полностью определяются некоторой суммой характеристик его элементарных составляющих. Редукционистская парадигма естествознания, берущая начало еще от Платона, нашла яркое и

успешное воплощение в научном методе Галилея, который затем был обоснован и принципиально развит Ньютоном. Современное общество обязано этой парадигме крупными успехами в области науки, технологии и промышленности. Основополагающими понятиями редукционистской картины мира считаются материя и движение; согласно им природа – это машина, состоящая, как и любой механизм, из отдельных частей со своими индивидуальными свойствами и описываемая раз и навсегда установленными законами математического естествознания.

Однако до Галилея и Ньютона доминировала, в основном, аристотелева система мира, согласно которой в природных процессах целое важнее его составляющих. Это так называемый холистический, то есть целостный, глобальный подход к пониманию окружающего. По Аристотелю, наш мир представляет собой иерархическую систему, в которой одни формы подчинены другим, находятся в динамической взаимосвязи. Холистический подход ориентирован на системный характер того или иного явления, для него целое – нечто большее, чем простая сумма составляющих, здесь важны связи и взаимодействия между частями целого как некоторой общей системы.

Перед современной наукой стоит трудная проблема выявления и изучения механизмов построения природных (экологических, биологических) систем, которые гарантируют высокую выживаемость и надежность функционирования систем в условиях изменения внутренней и внешней среды обитания. Эти и другие подобного рода обстоятельства возродили интерес к изучению и развитию глобальных подходов, что свидетельствует о возвращении к аристотелеву взгляду на эволюцию мира, разумеется, на новом витке его познания. Холистические представления опираются на такие базовые понятия, как "симметрия", "структура", "связность", которые здесь более важны, чем понятие "закон", доминирующее при редукционистском подходе. Для холистического взгляда на мир характерен системный подход, в котором главенствуют процессы синтеза по сравнению с традиционной аналитикой классического естествознания.

Классическая наука, на которую в основном опирается современная технократическая цивилизация, не учитывала такое явление, как жизнь. Более того, это было принципиально невозможно, ибо основания традиционной науки (обратимость и симметрия времени, консервативность классических динамических систем и др.) таковы, что там жизнь никак не может присутствовать по определению. Она представляет собой некую случайную и малозначимую аномалию в мире беспредельного господства второго начала термодинамики. Поэтому в классической науке человек отчужден от природы. Однако согласно современным взглядам, жизнь – это проявление когерентной диссипативной (от лат. dissipato –рассеивать) активности материи, находящейся в сильно неравновесном состоянии, а не бесперспективная борьба со вторым началом, отождествляемым с хаосом и беспорядком. Именно изучением процессов совместного поведения и явлений самоорганизации диссипативных систем произвольной природы – живых, технических, экономических, социальных и любых других – занимается синергетика, опирающаяся на холистические представления о живом и косном мире [1].

Еще совсем недавно само понятие "синергетика" было для многих необычным и непривычным, а ее базовые элементы – аттракторы, инварианты, самоорганизация, параметры порядка и принцип подчинения – вообще экзотическими для сугубых "технарей". К сожалению, и сейчас еще достаточно специалистов и, более того, преподавателей высшей школы, для которых новые научные веяния все еще остаются в тайне. Однако всем, кто относит себя к научным работникам и, тем более, к ученым в любой области науки, похоже, придется обратить свой взор на синергетику. Это неизбежно хотя бы потому, что, помимо принципиального расширения кругозора, синергетика позволяет каждому специалисту по–новому взглянуть на содержание и сущность своего участка, "арендуемого" у науки. Но синергетика – это еще и интеллектуальная радость, и эстетическое удовольствие от ее совершенства, целостности и

красоты. Один из первых исследователей красоты науки шотландский философ эпохи Возрождения Френсис Хатчесон выделил следующие три основных признака: красота суть единство в многообразии; красота заключена во всеобщности научных истин; научная красота – это обретение неочевидной истины [2].

Несомненно, что синергетика в полной мере отвечает этим замечательным признакам научной красоты. И, может быть, поэтому она с таким успехом проникает во все отрасли современной науки. Известный отечественный ученый–биофизик М.В. Волькенштейн отмечал, что синергетика представляет собой существенно новое мировоззрение, отличающееся от ньютоновского классицизма [3]. Синергетическая концепция означает введение новой эволюционной парадигмы в современное естествознание. Известный английский писатель и физик Чарльз Сноу предложил следующий тест на интеллектуальность: "Незнание второго начала термодинамики равносильно незнанию произведений Шекспира!" Сомнительно, чтобы многие из нас выдержали такой тест. Тем более это касается синергетики, которая не только опирается на второе начало термодинамики, но и принципиально расширила его значимость, дала ему новое понимание. Так, что, похоже, незнание синергетики может привести к интеллектуальной ущербности.

В предисловии "Наука и изменение" к знаменитой книге И. Пригожина и И. Стенгерс "Порядок из хаоса" известный философ О. Тоффлер в порядке диалога с авторами пишет; "Современная западная цивилизация достигла необычайных высот в искусстве расчленения целого на части, а именно в разложении целого на мельчайшие компоненты. Мы изрядно преуспели в этом искусстве, преуспели настолько, что нередко забываем собрать разъятые части в то единое целое, которое они некогда составляли. Особенно изощренные формы искусство разложения целого на составные части приняло в науке. Мы имеем обыкновение не только вдребезги разбивать любую проблему на осколки размером в байт или того меньше, но и нередко вычленяем такой осколок с помощью весьма удобного трюка. Мы произносим: "Ceteris paribus" – при прочих равных, и это заклинание позволяет нам пренебречь сложными взаимосвязями между интересующей нас проблемой и прочей частью Вселенной" [4]. Однако еще в древнекитайском учении даосизме утверждалось, что "все в одном, и одно во всем". Окружающий нас мир пронизан процессами самоорганизации, и в этой связи приведем высказывание выдающегося российского ученого Н.Н. Моисеева: «Процесс самоорганизации идет по пути непрерывного усложнения "алгоритмов развития", от "естественных", т.е. стихийных, опирающихся только на законы физики, химии, биологии ... к алгоритмам, устроенным гораздо более сложно... Все законы мира "естественного" сохраняют свою силу и в мире "искусственном", ибо он тоже порожден процессами самоорганизации, развития природы. Но теперь на действие этих процессов накладывается могучий пресс разума, накладываются новые принципы отбора, превращающие постепенно чисто стихийное развитие в направляемое» [5].

Сегодня, когда формируется постиндустриальное информационное общество, кардинальной проблемой становится существенное увеличение удельного веса искусственных регуляторов в единой целостной системе "общество – техносфера – природа". Основное внимание ученых, политиков и общественности все в большей мере концентрируется на фундаментальных проблемах управления, связанных с ресурсосберегающими технологиями, новой организацией социально–экономических систем, экологической и ядерной безопасностью информационного открытого общества. Очевидное существенное отличие стратегий технологической деятельности в начале XXI в. состоит в освоении принципиально новых типов объектов и процессов, представляющих собой весьма сложные саморазвивающиеся макросистемы. Помимо других важное место будут занимать человеко-размерные системы, которые включают в себя человека в качестве особого компонента. Это означает, что наступило время создания целостных человеко-машинных комплексов – развивающихся динамических макросистем "человек – техническая система – среда", в которые внедряются новые

перспективные технологии с учетом особенностей социокультурной среды. В таких комплексах, как в открытых самоорганизующихся макросистемах, возникают, как известно, кооперативные явления, базирующиеся в первую очередь не на силовых, а на информационных взаимодействиях. В результате проявления кооперативных эффектов развивающиеся системы порождают новые структуры без каких-либо внешних силовых воздействий. Иначе говоря, в сложных макросистемах возникают процессы самоорганизации, изучаемые современной нелинейной динамикой и синергетикой. Принципиально новые кооперативные явления такого рода в сложных макросистемах следует непременно учитывать при разработке эффективных стратегий деятельности человека. Они естественным образом должны быть включены в образовательные процессы новой мировоззренческой ориентации, связанные с переходом современного общества от индустриального к постиндустриальному развитию [6].

ОСОБЕННОСТИ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ В НАУКЕ

В любых макросистемах сигнал обратной связи обычно очень мал по сравнению с непосредственным силовым воздействием на соответствующий объект. Для задач управления важна не столько мощность сигнала управления, сколько его "смысловое" содержание, отражаемое информационными символами. Современная теория самоорганизации показала, что аналогичные информационные процессы протекают не только в искусственно созданных макросистемах, они возникают и в естественных физических системах, находящихся на границе устойчивости. Маломощные сигналы, действующие на такие системы в точках их бифуркаций, могут привести к значительным и даже катастрофическим последствиям. Это так называемые сложные открытые системы. Попав в область неравновесности, они показывают сложное динамическое поведение, в том числе и хаотическое. Существенно важно рассматривать их поведение как с точки зрения динамики, когда доминирующую роль играет энергия, так и с точки зрения протекающих в них информационных процессов, когда главное – в "смысловом" содержании сигналов управления.

Иначе говоря, появляется крупная проблема исследования совместного взаимодействия энергии, вещества и информации в сложных нелинейных системах в условиях их термодинамической неравновесности и влияния бифуркаций. В таких условиях в системе может возникнуть самоорганизация, когда оба процесса – энергетический (следовательно, динамический) и информационный – образуют неразрывное целое, приводящее к когерентному поведению огромного числа переменных нелинейной системы. Итак, встает новая актуальная проблема изучения нелинейных процессов в сложных физических открытых системах, через которые протекают потоки энергии, вещества и информации. Здесь возможно формирование сложных диссипативных структур и протекание кооперативных процессов, то есть проявление свойства самоорганизации. Отсюда следует, что данные системы могут сами собой разделяться на два иерархических уровня: энергетический (динамический) и информационно-управляющий. При этом, вообще говоря, в качестве второй подсистемы может выступать весь внешний мир.

Таким образом, добавление к энергетической компоненте макросистемы ее информационной составляющей расширяет область фазового пространства ее устойчивого существования. Информационная составляющая макросистемы связана с ее целью и во многом определяется структурой формируемых обратных связей, а энергетическая составляющая создает основу для ее информационного поведения. В свою очередь, каждая из локальных подсистем, входящих в общую макросистему, может содержать несколько уровней иерархии: на более высокий уровень поступает некоторая обобщенная информация, а на низших она конкретизируется. Пользуясь биологическим языком, можно сказать, что объект более высокого уровня иерархии выступает по отношению к объекту более низкого уровня как род к виду. Очевидно, что повышение статуса объекта в иерархии общей макросистемы ведет к соответствующему увеличению числа его степеней свободы –расширению фазового пространства системы. Другими словами, для преодоления "проклятия размерности"

необходимо, согласно принципу "расширения – сжатия" фазового пространства, уметь рассматривать систему в пространстве с большим числом координат. Такое расширение должно производиться с учетом аттракторов – целей системы. На каждом иерархическом уровне макросистема имеет свои инварианты – локальные цели. Изложенные здесь положения позволяют выдвинуть тезис о "благотворности высокой размерности" управляемых макросистем [7].

Учитывая чрезвычайно узкую специализацию многих наук, в первую очередь физических и технических, необходимо решить непростой вопрос о единой научной основе для формирования целостного взгляда на мир как единый эволюционный процесс. Между синергетикой и другими физическими, техническими, химическими, биологическими, экономическими науками имеется внутренняя взаимосвязь. В то же время синергетика в каждую из наук вносит свои особенности и подходы, которые не были присущи или даже были чужды традиционным направлениям этих наук. Современная наука, в отличие от классической, все в большей мере становится концептуальной. В этом отношении синергетика – не новая наука, а по существу новая концепция, базирующаяся на свойстве самоорганизации систем различной природы. Она стала претендовать на роль базовой и целостной парадигмы современного естествознания.

О ФИЗИКЕ, КИБЕРНЕТИКЕ И СИНЕРГЕТИКЕ

Вплоть до последнего времени наука, опираясь на законы сохранения, уделяла основное внимание изучению вещественно–энергетической организации природных и технических систем. Достигнуты крупные успехи в создании окружающей нас техносферы, однако во многих областях науки и техники уже близко подошли к достижению пределов технологического совершенствования (хотя указанный путь все еще остается доминирующим). Долгое время фактически в стороне от магистрального пути развития науки находились информационно–управляющие взаимодействия, присущие, в первую очередь, биологическим и современным сложным техническим системам. Отличительная особенность биосистем – именно управление, точнее, самоуправление с целью самосохранения, причем в максимально возможной степени. Возникла настоятельная необходимость выявления механизмов управления, действующих в природных и технических системах и лежащих в основе их функционирования и развития. В результате в середине XX в. появилась кибернетика – наука об управлении и связи в животном и машине, одним из основоположников которой был Норберт Винер.

Известно, что кибернетика изучает в первую очередь информационные взаимодействия между элементами и частями системы независимо от их физической (биологической, химической и др.) природы. Для кибернетики безразлично, из чего состоит та или иная система – из консервных банок, шестеренок, электрических машин или чего–то другого. Иначе говоря, вещественно–энергетическая сущность компонент соответствующих систем фактически игнорируется, главное – информационные взаимодействия, не требующие заметных затрат энергии и вещества. Такое абстрагирование от физической сущности управляемых процессов дало возможность кибернетике добиться на первых порах колоссальных успехов. Однако формализованный структурно–информационный подход к изучению процессов в реальных управляемых системах не позволил сбыться всем надеждам, возлагавшимся на кибернетику со стороны науки, техники и общества в целом: она так и не выявила истинных механизмов управляемого взаимодействия энергии, вещества и информации в сложных динамических системах.

Формирующаяся в настоящее время новая интегральная наука синергетика в течение короткого времени из теории неравновесных процессов превращается во всеобщую теорию развития, имеющую весьма широкие мировоззренческие следствия. Синергетике наиболее близка по своей идеологии прикладная теория управления. Весьма перспективным для современного ее развития представляется попытка перенести описанные выше свойства

синергетических систем на конструируемые системы управления нелинейными процессами. Необходимо отметить, что именно синтез такого рода систем является фундаментальной проблемой современной науки об управлении, которая отличается от методов синергетики тем, что не столько отыскивает возможные диссипативные структуры, сколько формирует нужные нам структуры для решения задач управления соответствующими динамическими объектами и системами. Разумеется, что при этом возникает непростая проблема перехода от естественных синергетических принципов к количественным соотношениям. Такой подход позволил построить новую синергетическую теорию управления (СТУ), имеющую глубокое естественно–научное обоснование как приложение принципов самоорганизации в проблемах управления [7, 8].

В упоминаемых нами работах Г. Хакена и И. Пригожина и их школ получены фундаментальные научные результаты в области исследования процессов, по существу, стихийной самоорганизации в системах различной физической природы. 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 добиться выдающихся результатов в исследовании кооперативных явлений в системах различной природы.

Однако для эффективного применения идей синергетики в проблемах управления причинного способа самоорганизации было явно недостаточно, и требовался новый, принципиальный шаг в понимании сущности процессов управления и самоуправления в синергетике. Новизна 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. 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. G информационной точки зрения способ направленной самоорганизации отражает процесс рецепции информации, что на языке теории динамических систем означает перевод соответствующей системы в определенное конечное состояние независимо от ее прежнего состояния. В свойстве самоуправляемости и направленной самоорганизации нелинейных систем проявляется новый взгляд на проблему управления, видна тенденция перехода от классических методов кибернетики к современным идеям синергетики.

СТУ позволяет по-новому поставить и эффективно решить многие трудные проблемы управления, которые либо не поддавались разрешению известными методами, либо вовсе не ставились в силу их особой сложности. Синергетический подход дал возможность принципиально расширить саму постановку проблемы управления и качественно изменить ее содержание как в отношении включения естественных свойств управляемых процессов в контекст задачи управления, так и в отношении охвата макрообластей фазового пространства конструируемых систем. Этот подход представляет собой развитие качественной и количественной теории динамических систем с сильно выраженным отражением физической (химической, биологической и др.) сущности управляемых процессов и поиском аналогов и законов поведения среди природных систем [9]. Для синергетической постановки задачи управления характерна оптимизация поведения систем не только в "большом", что является еще не решенной в должной мере проблемой существующей теории управления, но и в "сверхбольшом" – это "макропостановка" задачи управления. Ее суть состоит во введении в рассмотрение качественно новых режимов поведения нелинейных систем – бифуркаций и

фазовых переходов, опасных аттракторов в их пространстве состояний, неединственности решения задачи управления и др. Необходимость введения этих понятий связана с установлением фундаментального факта современного естествознания – возможности возникновения диссипативных пространственно-временных структур в фазовом пространстве сложных динамических систем. Образование таких структур характерно для макроскопического уровня описания поведения систем, что соответствует явлению самоорганизации. Указанные структуры наделяют систему принципиально новыми свойствами, которые не были присущи отдельным ее компонентам. Такие структуры представляют собой некоторые притягивающие инвариантные многообразия, которые, в свою очередь, формируют внутрисистемные динамические связи, в результате чего в фазовом пространстве систем возникает когерентное движение.

Существенное отличие СТУ от классической кибернетики состоит в том, что она базируется на информационно–физических взаимосодействиях в управляемых системах различной природы. При этом физическое (химическое, биологическое, экономическое и др.) начало выступает как одна из определяющих сущность процессов управления, а сами эти процессы базируются на явлениях самоорганизации, возникающих в системах конкретной природы. Та или иная природа системы и вводимые законы СТУ и определяют в конечном итоге процессы самоорганизации, самоуправления в системах. Вещественно–энергетические и информационные взаимодействия естественным образом согласуются друг с другом, что выражается в форме соответствующих физических инвариантов и аттракторов – целей функционирования систем. Информационные взаимодействия отражаются в виде нового механизма генерации естественной совокупности обратных связей, и именно в этом проявляется кибернетическая сторона СТУ. Кстати, изложенные здесь положения в полной мере относятся и к социально–экономическим системам.

Важно подчеркнуть, что основные принципы синергетики и СТУ в полной мере согласуются с фундаментальными идеями современной физики, в которой кардинальное значение придается не силовым внешним воздействиям, на чем основана классическая 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 классической физике вся сущность окружающего мира объяснялась через понятие силы, извне действующей на расстоянии. В современной физике силовые представления заменяются взаимодействиями между частицами посредством полей. Основная идея современной физики состоит в самосогласованности и внутренней последовательности всех законов природы. Здесь уместно напомнить один из постулатов даосизма: "Вещи получают свое существование и свою природу посредством взаимозависимости и ничем не являются сами по себе". В "И цзин" – "Книге перемен" – указывается: "Природные законы не являются внешними силами по отношению к вещам, они воплощают гармонию движения, свойственную самим вещам". Эти определения в современном научном толковании означают понимание сил взаимодействия как проявление некоторых динамических паттернов, присущих компонентам системы. Иначе говоря, в современной физике, как и в древнекитайской философии, картина мира понимается как непрерывная цепь взаимоотношений со своими внутренними динамическими связями.

Синергетика, однако, еще не построила всеобщую и единую теорию самоорганизации, справедливую для всех видов природных и технических систем. Поэтому в зависимости от конкретных свойств предметной области той или иной науки синергетический подход приобретает свои отличительные особенности и содержание. В настоящее время мы можем

рассматривать его как некоторую направляющую концепцию в соответствующей науке. Синергетика становится тем эволюционным естествознанием, которое позволяет уже говорить о возникновении своего рода метаязыка, помогающего целостному пониманию различных природных и технических явлений на основе единой научной концепции. Однако недостаточно указать лишь на те или иные особенности синергетической парадигмы современной постнеклассической науки. Не менее важно избавляться от повсеместного доминирования линейного подхода. Кардинальным в познании процессов самоорганизации природных систем является понимание неотделимости "порядка и хаоса", их парной дополнительности.

СИНЕРГЕТИКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Очевидно, что сейчас чрезвычайно актуальна проблема целостного видения и понимания окружающего мира – природы, техники, человека и общества – как единого эволюционного процесса. Синтез гуманитарных и естественных наук, возврат к изначально единой культуре человека и есть путь к новому пониманию этого процесса, который должен быть сформирован у будущего выпускника высшей школы. До сих пор многие вузы выпускали "широких специалистов" в весьма узких областях, а чаще – "узких специалистов" для вертикального бурения "колодцев специализации". Еще со времен Ньютона в науке бытует метафора о шахтном способе добычи различных специальных знаний, а каждый землекоп должен время от времени подниматься на поверхность подышать свежим воздухом. Очевидно, на заре классической науки великий ученый не предполагал, что именно такой, казавшийся весьма эффективным, способ получения знаний приведет через 300 лет к своей противоположности, станет фактически преградой на пути развития науки. Сейчас всем ясно, что именно узкая специализация – путь к перепроизводству информации. Неожиданный парадокс: чрезмерно большое количество частных результатов приводит к информационному голоду в разных областях знаний.

Как это ни покажется странным, компьютер – великое изобретение человека – при неумелом пользовании им может создавать недостаток в информации. Дело в том, что эта интеллектуальная машина, оперируя огромным количеством данных, создает у неискушенного студента или молодого ученого иллюзию всеохватности изучаемой проблемы. В действительности же компьютер нередко способствует размножению деталей и частностей рассматриваемого явления, придавая важную роль "дико частным" случаям. Знаменитый кибернетик С. Бир указывал, что данные представляют собой новейшую разновидность загрязнения окружающей среды [9]. К сожалению, такое положение до последнего времени существенно не изменилось. Односторонняя увлеченность компьютерами может увести студента с пути развития качественного мышления и, следовательно, целостного восприятия окружающего мира. Часто это приводит к формированию у пользователя пресловутого "кнопочного мышления".

Несмотря на компьютерную революцию, человечество, к сожалению, продолжает "топтаться" возле "старых" принципиально трудных динамических проблем. Современные компьютеры пока так и не решили многие из "вечных" вопросов, например, задачу полного исследования динамики трех (всего лишь!) тел или задачу среднесрочного (только на несколько месяцев!) прогноза погоды. Интеллектуальная "мощь" человечества, похоже, уперлась в динамическую задачу низкой размерности. В этом смысле homo sapiens все еще остается "темным" – в мифологиях многих народов по поводу размерности проблем говорится: "Один, два, а дальше – тьма!". А ведь нас окружают сплошь высокоразмерные нелинейные проблемы, не решив которые, мы не будем иметь больших перспектив для дальнейшего развития науки, технологий и общества.

И в этой связи возникает вопрос: учитывая нынешнюю сверхспециализацию прикладных и технических наук, на какой единой научной базе формировать у современного студента и молодого исследователя целостный взгляд на окружающий нас мир? Г. Хакен в приведенной

работе отмечает, что синергетические методы позволяют сжать информацию, перегруженную огромным количеством частных деталей, и затем превратить ее в небольшое число законов и концепций, отражающих макроскопические свойства соответствующих систем. В последние годы в силу самой логики развития науки в ней начались и сейчас значительно ускорились интеграционные процессы, связанные с кооперативными явлениями. На наш взгляд, интегральная наука синергетика, изучающая коллективные явления самоорганизации, охватывающие практически все отрасли знаний о косной и живой природе, технические и экономические науки, непременно должна изучаться студентами и аспирантами любого современного вуза.

Мы уже говорили, что рассматриваемая здесь синергетическая концепция – фундамент эволюционного естествознания, теперь она позволяет говорить о возникновении единого метаязыка инженера, естественника и гуманитария. Эта концепция, все в большей мере получающая признание и в России и за рубежом, должна быть включена в структуру научно–фундаментального образования выпускника каждого университета. На ее основе можно построить новое отношение к процессу научного познания, разрушить барьеры, установленные между отдельными отраслями высшего образования, науки и техники в виде специальных терминов и узкого профессионализма. Общим признаком, характерным для многих отраслей знания, стало выявление и формирование самоорганизующихся устойчивых структур.

Применение целостной синергетической концепции в обучении потребует внести принципиальные изменения в существующие программы фундаментальных дисциплин – физики и математики, а также всех базовых дисциплин соответствующих направлений. Так, например, в программы по математике необходимо ввести раздел "Основы нелинейной динамики" (бифуркации и катастрофы, фракталы, странные аттракторы, солитоны, устойчивость и неустойчивость и т.д.); в программы по физике – темы: "Время и эволюция", "Порядок из хаоса" и т.д. На наш взгляд, следует незамедлительно опубликовать серию принципиально новых учебных пособий и учебников, опирающихся на идеологию самоорганизации и язык аттракторов – инвариантов.

Сформировавшаяся–в современной науке синергетическая концепция фактически впервые в истории традиционного высшего образования дает великолепный шанс современному университету (классическому и техническому) сделать рывок в преобразовании учебного процесса и тем самым выдвинуться в число действительно элитарных вузов международного уровня. Главное заключается в коренном изменении содержания учебного процесса на основе новой концепции, а не в его технологической перестройке. С введением синергетической концепции будет принципиально повышена плотность получаемых знаний за один час учебного времени, учащийся освободится от значительной траты времени на рассмотрение громадного числа "дико частных случаев" различных прикладных наук. Следует отметить, что в ряде зарубежных и российских вузов – Московском государственном университете, Московском физико–техническом институте, Таганрогском государственном радиотехническом университете, Санкт–Петербургском государственном электротехническом университете, Саратовском государственном университете и др. – хотя и медленно, но уже начинают вводить эту концепцию в учебный процесс. В МГУ издается сборник "Синергетика", посвященный развитию синергетического подхода в разных областях современного естествознания.

В Европе и США функционируют более 50 подобных научно–образовательных центров. Россия не должна отставать. Давно назрела, например, необходимость создания федерального центра синергетических технологий управления и моделирования, который решал бы крупномасштабные проблемы синергетического управления – от технических комплексов до межрегиональных социально-экономических систем. Для этого имеется самое главное – сформировавшиеся научные школы в упомянутых выше вузах и высокий интеллектуальный потенциал.

Сейчас стало совершенно очевидно, что в современных университетах нужны новые междисциплинарные кафедры: "Синергетика и процессы управления", "Нелинейная динамика", "Самоорганизация и информация" и др. Более того, следует, на наш взгляд, начать формирование факультетов системных технологий для подготовки принципиально новой генерации специалистов, обученных нелинейному мышлению и обладающих синергетическим видением мира, техносферы и общества. В противном случае повторится ситуация, аналогичная неудачному старту кибернетики в нашей стране, что стало одной из причин последующего технологического и, следовательно, экономического отставания страны, приведшее ее в конечном итоге к "демократическому" краху.

Таким образом, казавшиеся многие годы бесперспективными попытки поиска унифицирующих научных принципов неожиданно получили эффективное решение в форме синергетической концепции современного естествознания. Методы обучения, опирающиеся на эту концепцию, таят в себе необычайно богатые возможности с точки зрения современного образовательного процесса. Г. Хакен определял ее так: «Я назвал новую дисциплину "синергетикой". В ней исследуется совместное действие многих подсистем, в результате которого на макроскопическом уровне возникает структура и соответствующее функционирование. С другой стороны, для нахождения общих принципов, управляющих самоорганизующимися системами, необходимо кооперирование многих различных дисциплин» [10]. Отсюда следует, что, с одной стороны, современный образовательный процесс целесообразно построить как процесс кооперативного взаимосодействия многих учебных дисциплин, а с другой – наладить тесное сотрудничество ученых и специалистов разных областей знания в рамках междисциплинарной системообразующей синергетической концепции, включающей в себя разнообразные разделы современного естествознания, в том числе "Нелинейная физика", "Неравновесная термодинамика", "Физика открытых систем", "Основы нелинейной динамики", "Хаотическая динамика", "Теория устойчивости и бифуркаций", "Теория катастроф", "Теория игр", "Самоорганизация в открытых системах", "Основы качественной теории динамических систем", "Основы синергетики", "Концепции современного естествознания", "Информация и самоорганизация", "Хаос и порядок", "Теория сложных систем", "Теория волновых процессов", "Синергетическая теория управления", "Самоорганизация биологических и экологических систем", "Синергетика экономических и социальных процессов", "Философские проблемы синергетики" и др. Разумеется, это только приблизительный блок базовых дисциплин, указанный перечень может меняться и конкретизироваться в зависимости от сложившихся традиций и особенностей конкретного университета.

В США и Европе многие ученые уже заговорили о "компьютерном разрушении западной цивилизации". По этой и более общим причинам, связанным с редукционистскими традициями западного мышления, видные специалисты ставят важные мировоззренческие вопросы о междисциплинарном взаимодействии и адаптации качества образования к общекультурным ценностям. Причем такие вопросы предлагается решать путем перехода от дифференцированности изучаемых дисциплин к их интеграции. Основное направление в развитии высшего образования в XXI в., в соответствии с декларацией ЮНЕСКО, усматривается в системном, междисциплинарном подходе, который полностью укладывается в русло синергетической концепции.

Часть 2. Новые методы синергетического синтеза нелинейных систем управления

На основе синергетического подхода был разработан принципиально новый метод синтеза – метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), существенно превосходящий известные методы теории управления: метод бэкстеппинга [11], методы оптимального и адаптивного управления [12,13] и др. Изложенные базовые понятия синергетического подхода в теории управления были опубликованы в работе [14] и других

монографиях. Указанный метод был применен для решения сложных прикладных проблем управления, во многих технических объектах, таких как: турбогенераторы, электромеханические системы, гибридные системы, промышленные объекты, подводные и летательные аппараты и др.

Метод АКАР [15-18] опирается на идею введения притягивающих инвариантных многообразий (ИМ) с которыми наилучшим образом согласуются естественные (энергетические, механические, тепловые и т.д.) свойства объекта и требования задач управления.

С математической точки зрения отличительная особенность постановки проблемы синергетического синтеза состоит в способе генерации такой совокупности обратных связей – законов управления, которые переводят систему из произвольного исходного состояния сначала в окрестность ИМ, а затем обеспечивают асимптотически устойчивое движение вдоль этих ИМ вплоть до попадания на целевые аттракторы. На этих аттракторах гарантируется выполнение заданных инвариантов – технологических, механических, энергетических и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980.
2. Волошинов А.В. Математика и искусство. М.: Просвещение, 1992.
3. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. М.: Наука, 1986.
4. Пригожий И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. С. 11.
5. Моисеев Н.Н. Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998. С. 201.
6. Степин В.С. Саморазвивающиеся системы и перспективы техногенной цивилизации // Синергетическая парадигма. М.: Прогресс–традиция, 2000.
7. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
8. Современная прикладная теория управления / Под ред. А.А. Колесникова. Ч. 1,2, 3. Москва – Таганрог: ФЦ "Интеграция", 2000.
9. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика, 1990. №11.
10. Вир С. Кибернетика и управление производством. М.: Изд–во иностр. лит-ры, 1963.
11. Колесников А.А., Колесников А.А., Кузьменко А.А. Методы АКАР и бэкстеппинг в задачах синтеза нелинейных систем управления. Мехатроника, автоматизация, управление. 2016;17(7):435-445.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-19-29

Заковоротный Вилор Лаврентьевич, Гвинджилия Валерия Енвериевна,
Подольцев Вячеслав Владимирович

Донской государственный технический университет

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПАРАДИГМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ

Аннотация. *На основе синергетической парадигмы в статье моделируется и анализируется сложная динамическая система, являющаяся совокупностью относительно автономных систем управления отдельными исполнительными элементами станка, образующих связанную (векторную) систему управления. В отличие от традиционных подходов к использованию синергетической теории управления в статье предлагается сочетание теории разделения движений на «быстрые» и «медленные», а также методов синергетического анализа и синтеза. Показано, что при условии согласования траекторий исполнительных элементов станка и асимптотической устойчивости подсистемы «быстрых» движений синтезируемая траектория по Методу АКАР для подсистемы «медленных» движений является глобальным аттрактором. При этом траектории исполнительных элементов образуют управляющие параметры, изменяющие свойства подсистемы «быстрых» движений, которая характеризует динамические свойства собственно процесса резания. Приводится пример эффективности нового, синергетического, подхода к управлению процессами обработки на станках.*

Ключевые слова*: динамическая система точения, синергетическая парадигма, метод разделения движений, качество изготовления деталей.*

Abstract. *The complex dynamic system is created and analyzed on based of the synergetic paradigm that is the combination of the relatively autonomous control system of the individual executive elements of machine forming the linked (vector) control systems. In contrast to the traditional approaches to the use of synergetic control theory, the article proposes a combination of the theory of motion separation into "fast" and "slow", as well as methods of synergetic analysis and synthesis. It is shown, that the trajectory is synthesized by the ACAR for the subsystem of "slow" movements is a global attractor that under the condition of according the trajectories of the executive elements of the machine and the asymptotic stability of the subsystem of "fast" movements. In this case, the trajectories of the actuators form the control parameters that change the subsystem properties of the "fast" motions are characterizing the dynamic properties of the cutting process. The example of the effectiveness of a new, synergistic approach to the control of the processes on the machines.*

Keywords: *dynamic turning system, synergetic paradigm, motion separation method, quality of workpiece.*

Введение.

После опубликования известных работ [1,2] многие проблемы анализа динамики систем, взаимодействующих с различными средами, стали рассматриваться под углом зрения самоорганизации. Применительно к системам управления эти работы стали стимулом создания синергетической теории управления [3,4], отдельные моменты которой использовались при управлении процессами обработки на металлорежущих станках [5 - 9]. При построении систем управления процессами обработки на станках используются различные концепции [10-16]. Во-первых, используется принцип подчинения всех координат программе ЧПУ, в которой определяются траектории исполнительных элементов станка по геометрическому образу детали.

Во-вторых, рассматриваются вопросы управления упругими перемещениями инструмента и детали, значения которых рассматривается на основе оценивания сил резания и текущей жесткости [17, 18]. Наконец используется принцип предельного состояния, согласно которому путем регулирования траекторий исполнительных элементов обеспечивается принадлежность некоторых координат состояния (например, сил) заданному множеству [10, 17]. Выход за пределы этого множества недопустим.

Однако в большинстве из приведенных исследований в области управления процессами обработки на станках главное внимание уделяется обеспечению траекторий исполнительных элементов станка, программе ЧПУ, в основу построения которой положен геометрический образ детали. При этом не принимается во внимание преобразование траекторий исполнительных элементов в траектории формообразующих движений инструмента относительно заготовки. Кроме этого не принимается во внимание, что за счет связи всех траекторий исполнительных элементов станка с процессом резания, относительно автономные подсистемы отдельными исполнительными элементами станка становятся системами связанного (векторного) управления. Системный синергетический подход к анализу и синтезу управления процессом резания, развиваемый в настоящей статье, является естественным продолжением известных исследований, позволяющий изыскать резервы повышения эффективности обработки на металлорежущих станках.

Система резания как объект синергетического управления.

При синергетическом подходе к анализу и синтезу изготовления деталей на металлорежущих станках необходимо, прежде всего, раскрыть понятие системы обработки на станке [3, 4, 7, 9]. В такое понятие входят подсистемы управления движением исполнительных элементов станка (для токарного станка традиционной компоновки – это траектории движения суппорта в плоскости и вращения шпинделя). Они характеризуются вектором скоростей $V^{(l)} = \{V_1^{(l)} = dl_1 / dt, V_2^{(l)} = dl_2 / dt, \Omega_3^{(l)} = d\alpha_3 / dt\}^T$ во времени или в функции перемещений, например, перемещений l_2 (рис.1). Они задаются в пределах опорных точек «0-1», «1-2» и так далее (рис. 1, «а»). Таким образом, например, по направлению l_2 траектория исполнительного движения продольного суппорта есть фазовая траектория $\{V_2^{(l)}, l_2\}$. Так как управляемые движения по направлению l_3 отсутствуют, то $V_3^{(l)} = 0$. В случае продольного точения также $V_1^{(l)} = 0$.

Подсистема упругих деформационных смещений инструмента и заготовки в точке контакта с ней инструмента. Такая подсистема вводится на основе синергетического принципа расширения размерности пространства состояния, и она, во-первых, учитывает отличие траекторий исполнительных элементов от траектории формообразующих движений. Во-вторых, при анализе она позволяет преобразовать относительно автономные подсистемы в подсистему связанного (векторного) управления. Таким образом, траектории формообразующих движений $l^{(\Phi)} = \{l_1^{(\Phi)}, l_2^{(\Phi)}, l_3^{(\Phi)}\}^T$ отличаются от траекторий движения исполнительных элементов на величины упругих деформационных смещений инструмента (рис. 1, «с») $X = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \Re_X^{(3)}$ и заготовки $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3\}^T \in \Re_Y^{(3)}$ (точка «О» смещается для инструмента в точку «$O^{(1)}$», а для заготовки в точку «$O^{(2)}$»). Таким образом, траектория формообразующих движений отличается от траектории перемещений исполнительных элементов $l = \{l_1, l_2, l_3 = 0\}^T$ на величину упругих деформационных смещений, то есть

$$\begin{cases} l_1^{(\Phi)}(t) = l_1(t) - X_1(t) - Y_1(t); \\ l_2^{(\Phi)}(t) = l_2(t) - X_2(t) - Y_2(t); \\ l_3^{(\Phi)}(t) = -X_3(t) - Y_3(t). \end{cases} \quad (1)$$

Для синергетического подхода необходимо раскрыть взаимодействия управляемых движений с процессом обработки. Взаимодействие определяется моделью сил резания в координатах состояния [2]. Следуя работе [9], примем гипотезу о зависимости сил от площади срезаемого слоя и их преобразования по направлениям $\Re_X^{(3)}$ и $\Re_Y^{(3)}$ с помощью угловых коэффициентов $\chi = \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}$, удовлетворяющих условию нормировки $\chi^2 = (\chi_1)^2 + (\chi_2)^2 + (\chi_3)^2$.

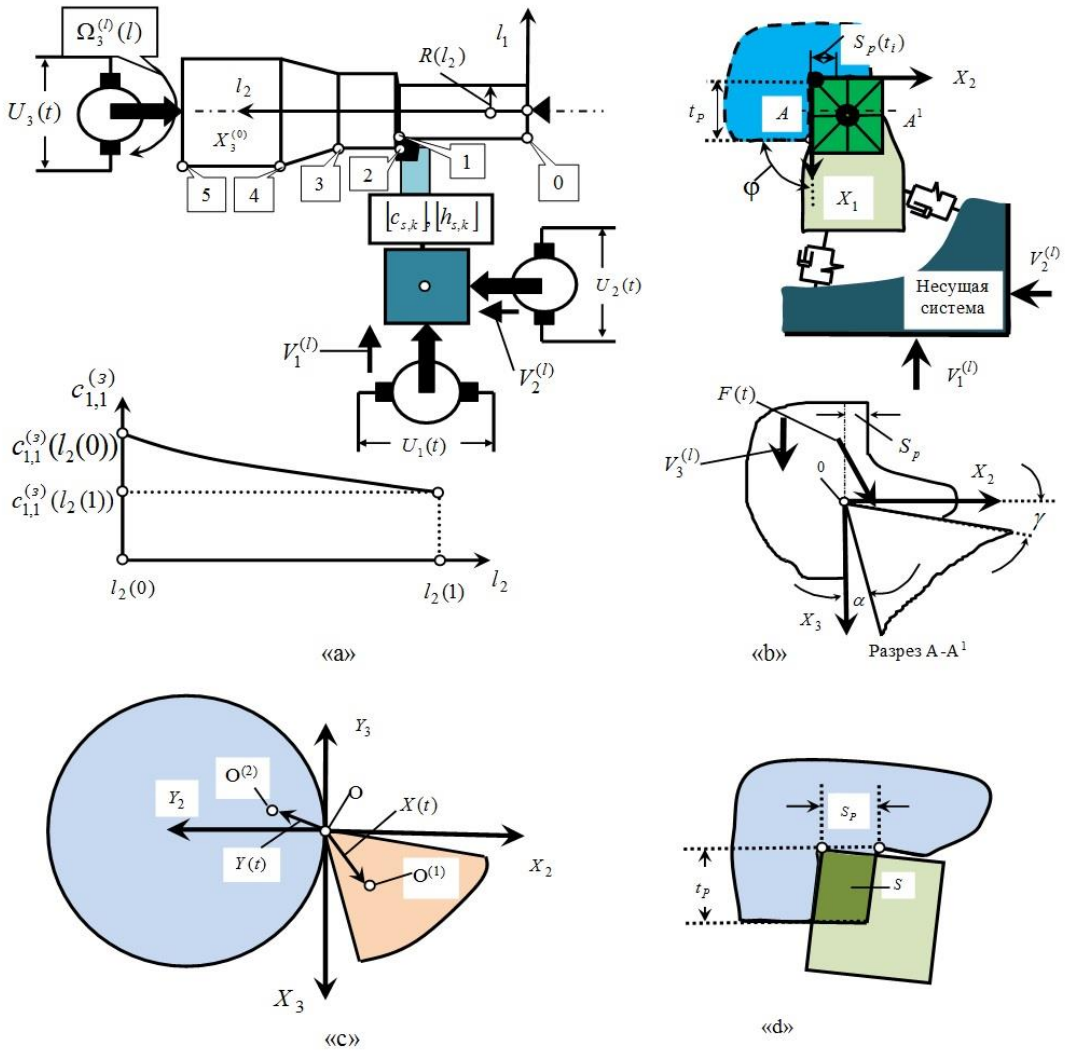


Рисунок 1. Система продольного точения: a – схема управления траекториями исполнительных элементов; b – схема сил и деформационных смещений подсистемы инструмента; c - направление деформационных смещений инструмента и заготовки; d – схема формирования площади срезаемого слоя

Тогда уравнение динамики процесса резания можно представить в виде

$$M\, d^2Z/dt^2 + H\, dZ/dt + CZ = F \quad (2)$$

где $Z = \{X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3\}^T$; $F = F_0\{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$;

$$C=\begin{bmatrix} c_{1,1}^{(u)} & c_{2,1}^{(u)} & c_{3,1}^{(u)} & 0 & 0 & 0 \\ c_{1,2}^{(u)} & c_{2,2}^{(u)} & c_{3,2}^{(u)} & 0 & 0 & 0 \\ c_{1,3}^{(u)} & c_{2,3}^{(u)} & c_{3,3}^{(u)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{1,1}^{(з)}(l_2) & c_{2,1}^{(з)}(l_2) & c_{3,1}^{(з)}(l_2) \\ 0 & 0 & 0 & c_{1,2}^{(з)}(l_2) & c_{2,2}^{(з)}(l_2) & c_{3,2}^{(з)}(l_2) \\ 0 & 0 & 0 & c_{1,3}^{(з)}(l_2) & c_{2,3}^{(з)}(l_2) & c_{3,3}^{(з)}(l_2) \end{bmatrix},$$

$$H=\begin{bmatrix} h_{1,1}^{(u)} & h_{2,1}^{(u)} & h_{3,1}^{(u)} & 0 & 0 & 0 \\ h_{1,2}^{(u)} & h_{2,2}^{(u)} & h_{3,2}^{(u)} & 0 & 0 & 0 \\ h_{1,3}^{(u)} & h_{2,3}^{(u)} & h_{3,3}^{(u)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{1,1}^{(з)}(l_2) & h_{2,1}^{(з)}(l_2) & h_{3,1}^{(з)}(l_2) \\ 0 & 0 & 0 & h_{1,2}^{(з)}(l_2) & h_{2,2}^{(з)}(l_2) & h_{3,2}^{(з)}(l_2) \\ 0 & 0 & 0 & h_{1,3}^{(з)}(l_2) & h_{2,3}^{(з)}(l_2) & h_{3,3}^{(з)}(l_2) \end{bmatrix},$$

$$M=\begin{bmatrix} m^{(u)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{1,2}^{(u)} & m^{(u)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m^{(u)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m^{(з)}(l_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m^{(з)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m^{(з)}(l_2) \end{bmatrix}$$

положительно определенные симметричные матрицы упругих скоростных и инерционных коэффициентов соответственно в $[кг/мм]$, $[кг\cdot с/мм]$, $[кг\cdot с^2/мм]$. Причем, матрицы подсистемы инструмента остаются неизменными вдоль оси l_2, а заготовки зависят от l_2.

В (2) модуль силы резания F_0 представляется в виде [9]

$$T_0 dF_0/dt + F_0 = \rho_0\{1+\mu\exp[-\alpha(V_3^{(l)} - dX_3/dt - dY_3/dt)]\}[t_P^{(0)} - X_1 - Y_1]\int_{t-T}^{t}\{V_2^{(l)} - dX_2/dt - dY_2/dt\}dt \qquad (3)$$

где T_0-постоянная времени запаздывания сил в $[c]$; ρ_0- давление на переднюю поверхность в области малых скоростей в $кг/мм^2$; μ - безразмерный коэффициент, определяющий соотношение сил в областях малых и больших скоростей; α- коэффициент, определяющий убывание сил при увеличении скорости; $V_i^{(l)}, i=1,2,3$- управляемые от ЧПУ скорости исполнительных элементов, приведенные к линейным перемещениям в $мм/с$. В (3) интегральный оператор $\int_{t-T}^{t}\{V_2^{(l)} - dX_2/dt - dY_2/dt\}dt$ характеризует закон формирования величины подачи $S_P(t)$, а выражение $t_P(t)=[t_P^{(0)}(t) - X_1(t) - Y_1(t)]$ определяет значение глубины резания, связанное с (1) соотношением $t_P(t) = R(t) - \int_0^t V_1^{(l)}(\xi)d\xi + X_1(t) + Y_1(t)]$. Таким образом, площадь срезаемого слоя $S(t) = S_P(t)t_P(t)$ (рис.1, «d»). Динамика системы резания зависит от управления $V_i^{(l)}, i=1,2,3$ и параметров, зависящих от перемещения вдоль оси вращения заготовки. Системы (2) и (3) необходимо дополнить уравнениями, связывающими управление

$U=\{U_1,U_2,U_3\}^T$ и траектории исполнительных элементов. Будем рассматривать приводы исполнительных элементов на основе двигателей постоянного тока с якорным управлением, тогда [6]

$$\Omega_0^{(i)}=T_{ЭМ}^{(i)}T_Э^{(i)}d^2\Omega^{(i)}/dt^2+T_{ЭМ}^{(i)}d\Omega^{(i)}/dt+\Omega^{(i)}+K_M^{(i)}\{M_i(\Omega^{(1)},\Omega^{(2)},\Omega^{(3)})+$$
$$+T_Э^{(i)}[\partial M_i/\partial\Omega^{(1)}\cdot d\Omega^{(1)}/dt+\partial M_i/\partial\Omega^{(2)}\cdot d\Omega^{(2)}/dt+\partial M_i/\partial\Omega^{(3)}\cdot d\Omega^{(3)}/dt]\},\ i=1,2,3 \quad (4)$$

где $\Omega_0^{(i)}=U_i/c_e^{(i)}$ управление, приведенное к якорю двигателя с $\left[c^{-1}\right]$; $T_{ЭМ}^{(i)}=J_iR_i/c_e^{(i)}c_M^{(i)}$, $T_Э^{(i)}=L_i/R_i$ электромеханическая и электрическая постоянные времени двигателя в $[c]$; $K_M^{(i)}=R_i/c_e^{(i)}c_M^{(i)}$ - параметр, характеризующий влияние момента резания на якорь серводвигателя в $\left[(кгмс)^{-1}\right]$; $R_i, L_i, J_i, c_e^{(i)}, c_M^{(i)}$ - параметры двигателей. Причем, справедливо

$$V_i^{(l)}=n_i\Omega^{(i)} \quad (5)$$

то есть механическая часть приводов исполнительных элементов является абсолютно жесткой и n_i измеряется в $[мм]$.

Система (4) показывает, что за счет реакции со стороны процесса резания все три относительно автономных двигателей становятся взаимосвязанными, а системы управления движением исполнительных элементов становятся системами векторного управления. Системы (2) – (4) отражают главные свойства динамической системы резания и позволяют проанализировать управление процессом резания как единой взаимосвязанной системы, управление в которой подчинено цели изготовления деталей заданного качества при минимизации приведенных затрат на изготовление партии деталей.

Реализация синергетического подхода.

Не нарушая общности, ограничимся рассмотрением продольного точения детали постоянного диаметра (участок «0–1» на рис. 1, «а»). Проанализируем наиболее важный случай, когда матрицы жесткости подсистемы заготовки существенно меньше подсистемы инструмента. Этот случай представляет наибольший интерес для предприятий авиакосмической промышленности. Будем следовать основным положениям синергетической теории управления [3, 9].

Прежде всего, сформулируем цель процесса как изготовление деталей заданной точности при обеспечении физической оптимальности резания. Известно, что физическая оптимальность достигается при условии постоянства скорости резания, которая выбирается из условия минимизации интенсивности изнашивания инструмента [20]. Для обеспечения постоянства диаметра необходимо выбирать траектории исполнительных элементов так, чтобы $t_P^{(0)}-Y_1=const$.

Ранее показано [9], что при анализе (2) – (4) можно воспользоваться принципом разделения движений на «медленные», лежащие в пределах полосы пропускания серводвигателей, и «быстрые», рассматривающие деформационные смещения в частотном диапазоне, определяемом избирательными свойствами подсистем со стороны инструмента и заготовки. Возможность разделения движений вытекает из свойств асимптотического поведения нелинейных дифференциальных уравнений, имеющих малый параметр при производной [21]. Синтез управления выполним в два этапа. На первом этапе рассмотрим управление «медленными» движениями. Рассмотрим случай $t_P^{(0)}=const$, тогда

$$\begin{cases} V_3^{(l)} = n_3\Omega^{(3)} = const; & "a" \\ \rho_0\{1+\mu\exp[-\alpha(V_3^{(l)})]\}[t_P^{(0)} - Y_1^{(0)}] \int\limits_{t-(\Omega^{(3)})^{-1}}^{t}\{V_2^{(l)}\}dt & "b" \\ \dfrac{}{c_\Sigma^{(з)}(l_2)} = Y_1^{(0)} = const. \end{cases} \quad (6)$$

где $c_\Sigma^{(з)}(l_2)$ - приведенная суммарная жесткость заготовки, зависящая от матриц жесткости и угловых коэффициентов; $Y_1^{(0)}$ - постоянное значение деформационных смещений вдоль оси заготовки l_2. Вначале положим, что условие (6, «a») выполняется. Тогда для выполнения условия (6, «b») необходимо

$$\Omega_2(l_2) = \frac{n_3\Omega^{(3)}c_\Sigma^{(з)}(l_2)Y_1^{(0)}}{n_2\rho_0\{1+\mu\exp[-\alpha(V_3^{(l)})]\}[t_P^{(0)} - Y_1^{(0)}]} \quad (7)$$

где, $c_\Sigma^{(з)}(l_2) = \dfrac{\begin{bmatrix} c_{1,1}^{(з)}(l_2) & c_{2,1}^{(з)}(l_2) & c_{3,1}^{(з)}(l_2) \\ c_{1,2}^{(з)}(l_2) & c_{2,2}^{(з)}(l_2) & c_{3,2}^{(з)}(l_2) \\ c_{1,3}^{(з)}(l_2) & c_{2,3}^{(з)}(l_2) & c_{3,3}^{(з)}(l_2) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1}^{(з)}(l_2) & c_{3,1}^{(з)}(l_2) \\ \chi_2 & c_{2,2}^{(з)}(l_2) & c_{3,2}^{(з)}(l_2) \\ \chi_3 & c_{2,3}^{(з)}(l_2) & c_{3,3}^{(з)}(l_2) \end{bmatrix}}$.

Выражение (7) фактически является желаемой фазовой траекторией продольного перемещения суппорта, которая может задаваться одним из способов программирования траекторий суппорта. В зависимости от начальных технологических режимов существует множество траекторий $\Omega_2(l_2) \in \Im$. Для обеспечения условия (6 «a») воспользуемся методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [3]. При токарной обработке силовым влиянием процесса резания на двигатели подачи можно пренебречь. Это связано с тем, что передаточное отношение между двигателем и перемещением суппорта есть величина большая. Кроме этого положим, что шпиндель жестко связан с ротором двигателя его вращения. Тогда из (3) и (4) имеем

$$\begin{cases} d\Omega^{(3)} / dt = Z(t); \\ dZ / dt = (T_{ЭМ}^{(3)}T_Э^{(3)})^{-1}\{\Omega_0^{(3)} - T_{ЭМ}^{(3)}Z(t) - \Omega^{(3)} - M_\Sigma(\Omega^{(3)}, l_2)\}, \end{cases} \quad (7)$$

где $M_\Sigma(\Omega^{(3)}, l_2) = \dfrac{K_M(l_2)R_3}{c_e^{(3)}c_M^{(3)}}\{\dfrac{1+\mu\exp(-\alpha\Omega^{(3)})}{\Omega^{(3)}} - T_Э^{(3)}\dfrac{1+\mu\exp(-\alpha\Omega^{(3)})(1+\alpha\Omega^{(3)})}{(\Omega^{(3)})^2}\dfrac{d\Omega^{(3)}}{dt}\}$;

$K_M(l_2) = n_2\chi_3 R\rho_0[t_P^{(0)} - Y_1^{(0)}]\Omega^{(2)}(l_2)$; R - радиус заготовки в точке контакта с ней инструмента. Для подсистемы (7) синтезируем методом АКАР управление, обеспечивающее условие $\Omega^{(3)} \Rightarrow \Omega_{0,0}^{(3)}$. Для этого введем в рассмотрение две агрегированные координаты $\psi_1 = \Omega^{(3)} - \Omega_{0,0}^{(3)}$ и $\psi_2 = Z - \varphi(\Omega^{(3)})$, а также два функциональных уравнения

$$\begin{cases} T_1 d\psi_1 / dt + \psi_1 = 0; \\ T_2 d\psi_2 / dt + \psi_2 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

После очевидных преобразований имеем закон синергетического управления в координатах состояния системы

$$U_3 = c_e^{(3)}[Ad\Omega^{(3)}/dt + B\Omega^{(3)} + M_\Sigma(\Omega^{(3)}, l_2) + C\Omega_{0,0}^{(3)}] \qquad (9)$$

где $A = \frac{T_{ЭМ}^{(3)}(T_1 - T_Э^{(3)})}{T_1}$; $B = \frac{T_1T_2 - T_{ЭМ}^{(3)}T_Э^{(3)}}{T_1T_2}$; $C = \frac{T_{ЭМ}^{(3)}T_Э^{(3)}}{T_1T_2}$.

В (9) координаты $\Omega^{(3)}, l_2$ являются наблюдаемыми. Для определения $d\Omega^{(3)}/dt$ легко построить наблюдатель на основе $\Omega^{(3)}, l_2, I_3$. Для этого рассмотрим механическую часть двигателя вращения шпинделя. Очевидно соотношение

$$\frac{d\Omega^{(3)}}{dt} = \frac{1}{J_3}\{c_M^{(3)}I_3 - n_2\chi_3R\rho_0[1+\mu\exp(-\alpha\Omega^{(3)})][t_P^{(0)} - Y_1^{(0)}]\frac{K_M(l_2)R_3}{c_e^{(3)}}\frac{\Omega^{(2)}(l_2)}{\Omega^{(3)}}\} \qquad (10)$$

Как уже отмечено, приведенный синтез обеспечивает технологические условия (6) в предположении, что подсистема «быстрых» движений является асимптотически устойчивой. Эта подсистема рассматривается в вариациях относительно траекторий $Y_i^{(0)}, i = 1,2,3$ и $F_0^{(0)}$, которые получаются в результате синергетического синтеза подсистемы «медленных» движений.

Второй этап синтеза заключается в согласовании внешнего управления с внутренней динамикой системы. Ограничимся обеспечением асимптотической устойчивости «быстрых» движений. После замены $Y_i(t) = Y_i^{(0)} + y_i(t), i = 1,2,3$, $F_0(t) = F_0^{(0)} + f(t)$ получаем линеаризованное уравнение в вариациях относительно траектории «медленных» движений, анализ которого позволяет выяснить устойчивость системы в целом [22]. После несложных преобразований имеем

$$Md^2z/dt^2 + Hdz/dt + Cz = 0 \qquad (11)$$

где $z(t) = \{y_1(t), y_2(t), y_3(t), f(t)\}^T$;

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} h_{1,1}^{(3)} & h_{2,1}^{(3)} & h_{3,1}^{(3)} & 0 \\ h_{1,2}^{(3)} & h_{2,2}^{(3)} & h_{3,2}^{(3)} & 0 \\ h_{1,3}^{(3)} & h_{2,3}^{(3)} & h_{3,3}^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & \rho_0\alpha\exp(-\alpha V_3^{(l)})[S_P^{(0)}t_P^{(0)} + S_P^{(0)}Y_1^{(0)} + t_P^{(0)}Y_2^{(0)}] & T_0 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1}^{(3)} & c_{2,1}^{(3)} & c_{3,1}^{(3)} & \chi_1 \\ c_{1,2}^{(3)} & c_{2,2}^{(3)} & c_{3,2}^{(3)} & \chi_2 \\ c_{1,3}^{(3)} & c_{2,3}^{(3)} & c_{3,3}^{(3)} & \chi_3 \\ \rho_0\alpha S_P^{(0)}[1+\exp(-\alpha V_3^{(l)})] & \rho_0\alpha t_P^{(0)}[1+\exp(-\alpha V_3^{(l)})] & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Анализ (11) показывает, что устойчивость «медленных» движений зависит, как от параметров взаимодействующих подсистем и формируемой резанием динамической связи, так и от траекторий исполнительных элементов, задающих в (11) $V_3^{(l)}$, $S_P^{(0)}$ и $t_P^{(0)}$ с учетом «медленных» деформационных смещений $Y_1^{(0)}$ и $Y_2^{(0)}$. Подчеркнем, что траектории исполнительных элементов фактически определяют медленно изменяющиеся и управляемые параметры в подсистеме «быстрых» движений. «Медленные» деформации в направлении $Y_3^{(0)}$ не влияют на динамику процесса резания. Поэтому необходимо выбрать из $\Omega_2(l_2) \in \Im$ такое множество траекторий, которое удовлетворяет условиям асимптотической устойчивости «быстрых» движений. Согласование заключается, как в определении траекторий

исполнительных элементов, задаваемых системой ЧПУ, так и в изменении параметров динамической связи и взаимодействующих подсистем конструктивными способами.

Проиллюстрируем синтез управления на примере. Пусть задан закон изменения жесткости

$$c(l_2) = c_0[1+\exp(-\alpha_l l_2)] \qquad (12)$$

где α_l - параметр в $\left[мм^{-1}\right]$. Сечение заготовки обладает свойством равенства жесткостей по всем направлениям в плоскости, нормальной к оси вращения. Поэтому в (11) все недиагональные элементы матриц жесткости, инерционных и скоростных элементов равны нулю. Приведем вычисленные границы областей устойчивости с учетом указанных выше особенностей подсистемы заготовки (рис. 2). Параметры системы и динамической связи приведены в табл.1.

Таблица1. Параметры системы и динамической связи

c_0, *кг / мм*	h_0, *кгс / мм*	m_0, *кгс*^{2} / *мм*	$\alpha_l, мм^{-1}$	χ_1	χ_2	χ_3	α, *с / м*	ρ_0, *кг / мм*^{2}
50	0,1	0,0025	0,05	0,7	0,5	0,5	1,2	500

При построении диаграмм устойчивости приняты во внимание зависимости параметров от технологических режимов, прежде всего, постоянной времени [23] $T_0 = \xi K^{(l)} / V_3^{(l)}$ (ξ-усадка стружки; $K^{(l)}$ – коэффициент, имеющий смысл пути резания). На иллюстрации система теряет устойчивость выше приведенных фигуративных линий. Повышение стабильности равновесия при уменьшении глубины резания является очевидной, так как в этом случае уменьшаются основные параметры, способствующие потере устойчивости. Возрастание склонности системы к потере устойчивости в среднескоростном диапазоне объясняется противоречивым влиянием запаздывания сил по отношению к вариациям площади срезаемого слоя. С одной стороны, при увеличении постоянной времени T_0 (уменьшении скорости резания) в систему вводится дополнительный фазовый сдвиг, но при этом увеличивается затухание системы. Отметим, что наибольшая склонность системы к потере устойчивости наблюдается при T_0 приближающейся к величинам, обратным собственным частотам колебательных контуров в подсистеме инструмента и заготовки.

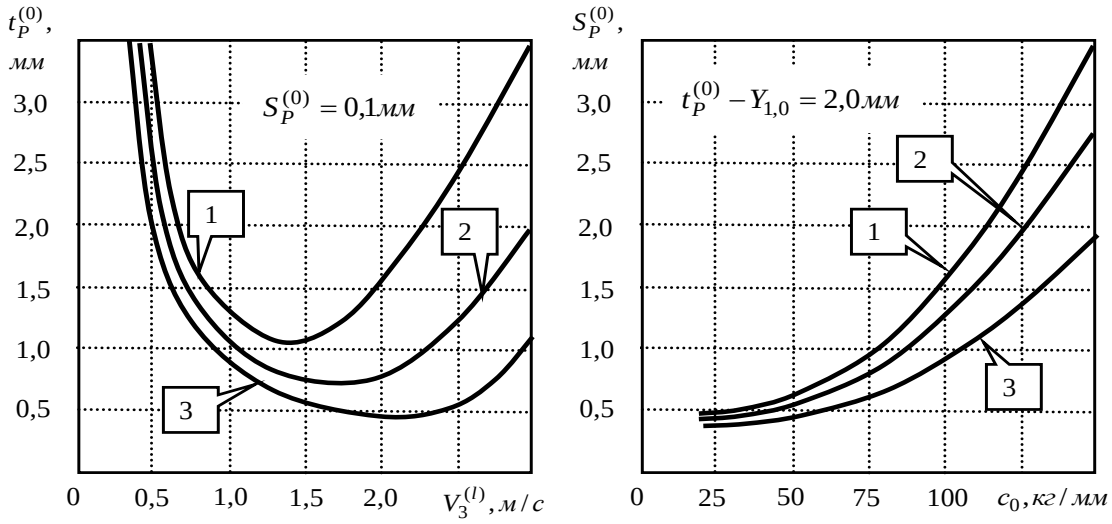


Рисунок 2. Области устойчивости «замороженной» системы:1 – *h_0=0,05;* 2 - *h_0=0,1;;* 3 - *h_0=0,15*

Приведенные данные показывают, что в зависимости от траектории (12) параметры линеаризованного уравнения в вариациях относительно траектории «медленных» движений

изменяются и в параметрическом пространстве изображающая точка может пересекать фигуративную линию на рис.2. Тогда синтезированная траектория становится на некотором участке неустойчивой. В этом случае необходимо изменить, либо параметры взаимодействующих подсистем конструктивными методами, либо сместить значение скорости резания для обеспечения устойчивости подсистемы «быстрых» движений.

Анализ результатов.

При использовании синергетической теории управления для систем обработки на металлорежущих станках необходимо учитывать, что управляемые от регулируемых приводов траектории исполнительных элементов станка лежат в частотном диапазоне, на два порядка меньшем, чем частотный состав деформационных смещений инструмента относительно заготовки. Поэтому синтез управления выполняется в два этапа.

На первом этапе выполняется разделение движений траекторий формообразующих движений на «медленные», лежащие в пределах полосы пропускания серводвигателей с учетом «медленных» деформационных смещений инструмента относительно заготовки и «быстрые» движения. Частотный состав «быстрых» движений определяется избирательными свойствами взаимодействующих подсистем деформаций инструмента и заготовки. Деформационные смещения рассматриваются в точке контакта вершины инструмента с заготовкой. **На втором этапе** на основе использования синергетической теории управления, в частности метода АКАР, разработанного А.А.Колесниковым [3], синтезируются системы, обеспечивающие требуемые траектории формообразующих движений. Они определяются исходя из точности обработки и оптимального значения скорости резания, при которой минимизируется интенсивность изнашивания инструмента. При этом учитывается, что подсистемы управления исполнительными элементами станка за счет динамической связи, формируемой процессом резания, становятся системами связанного (векторного) управления. При этом динамическая связь есть ни что иное, как модель сил резания, представленных в координатах состояния системы. **На третьем этапе** осуществляется согласование управляемых траекторий «медленных» движений со свойствами динамической системы резания. При этом учитывается, что траектории «медленных» движений, задающие технологические параметры системы, фактически являются управляющими параметрами, изменения которых варьируют свойства подсистемы «быстрых» движений. Разработанные математические модели и методика позволяют выбрать из множества допустимых траекторий «медленных» движений те, при которых подсистема «быстрых» движений становится асимптотически устойчивой, а синтезированные методом АКАР траектории являются глобальными аттракторами, как для «быстрых», так и для «медленных» движений.

Заключение.

Приведенный пример синергетического синтеза процессами обработки на металлорежущих станках открывает новое эффективное направление повышения эффективности процессов обработки нам металлорежущих станках. При этом решается двуединая задача оптимизации, основанная минимизации приведенные затраты на изготовление деталей, а также обеспечения требуемой точности изготовления деталей. Методика синергетического подхода к синтезу может практически без изменения использоваться для синтеза движением механических систем, взаимодействующих с различными средами (трибологическими, аэродинамическими и пр.).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-08-00022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хакен Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003.-320 с.

2. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1978. – 488 с.

3. Синергетика и проблемы теории управления/ Под ред. А.А.Колесникова.// М.: ФИЗМАТЛИТ,2004. -504 с.

4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

5. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D. The problems of control of the evolution of the dynamic system interacting with the medium. International Journal of Mechanical Engineering and Automation. 2014. Т. 1. № 5. С. 271-285.

6. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Лукьянов А.Д. Использование синергетической концепции для изучения устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезеровании. СТИН. 2016. № 4. С. 32-40.

7. Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Фам Д.Т. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы. Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 10 (61). С. 1785-1797.

8. Заковоротный В.Л., Лапшин В.П., Туркин И.А. Управление процессом сверления глубоких отверстий спиральными сверлами на основе синергетического подхода. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2014. № 3 (178). С. 33-41.

9. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания. Синергетический подход. Ростов-на-Дону: Изд-во «Терра», 2006. 876 с.

10. Заковоротный В.Л., Санкар Т., Бордачев Е.В. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра. СТИН. 1994. № 12. С. 22-25.

11. Заковоротный В.Л., Панов Е.Ю., Потапенко П.Н. Свойства формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра. Вестник Донского государственного технического университета. 2001. Т. 1. № 2. С. 81-93.

12. Проектирование автоматизированных станков и комплексов. В двух томах. / Под ред. П.М. Чернянского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. Т.1. 331 с., Т.2. 303 с.

13. Максимов С.П., Колосов В.Э., Морозов К.Н. Современное состояние и перспективы развития систем ЧПУ // Инновации в науке: сб. ст. по матер. XL междунар. науч.-практ. конф. № 12(37). – Новосибирск: СибАК, 2014.

14. Ратмиров В.А., Чурин И.Н., Шмутер С.Л. Повышение точности и производительности станков с программным управлением. М.: Машиностроение, 1970. – 343 с.

15. Многоцелевые системы ЧПУ гибкой механообработкой / В.Н. Алексеев, В.Г. Воржев, Г.П. Гырдымов и др.; под общ. ред. В.Г. Колосова. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1984. — 224 с.

16. Легаев В.П., Генералов Л.К. Повышение эффективности токарной обработки на основе автоматического контроля показателей процесса резания. Вестник машиностроения. 2011. №1.- С 44-46.

17. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков / Б.М. Базров. — М.: Машиностроение, 1978. — 216 с.: ил.

18. Адаптивное управление станками / под ред. Б.С. Балакшина. — М.: Машиностроение, 1973. — 688 с.

19. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергия, 1980. 560 с.

20. Рыжкин А.А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке. Ростов –на-Дону: изд-во ДГТУ, 2019. -289 с.

21. Тихонов А.Н. Системы дифференциальных уравнений с малым параметром при высших производных. М.: Математический сборник, 1952, т.31, № 3, с. 231 – 239.

22. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения //М.: Из-во АН СССР, 1956. – 475 с.
23. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, , 1967. 359 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-30-40

Веселов Геннадий Евгеньевич, Скляров Андрей Анатольевич

Южный федеральный университет

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

Аннотация. *В статье рассматриваются современные методы синтеза законов группового управления движением группой мобильных роботов. Приводиться краткая характеристика каждого из методов, дается оценка сильных и слабых сторон применения при синтезе стратегий управления группой роботов. Наиболее подробно рассматривается метод базирующийся на принципах и методах синергетической теории управлении применительно к задаче формирования строя роботов. Описываются условия устойчивости и области применения данного метода. Приводиться компьютерное моделирование для доказательства эффективности представленного метода.*

Ключевые слова: *групповое управление, методы управления, нелинейная математическая модель.*

Annotation. *The paper present advanced methods for synthesizing the group control laws for solving the formation task of mobile robots. A brief description of each of the methods is given, an assessment of the pros and cons of the application in the synthesis of strategies for managing a group of robots is given too. The method based on the principles and methods of the synergetic theory of control as applied to the task of forming the system of robots is detail considered. The stability conditions and the scope of this method are described. Computer simulation is presented to prove the effectiveness of the presented method.*

Keywords: *group control, non-linear mathematical model, synergetic control theory.*

Введение.

Исследования в области коллективного поведения роботов проводятся уже более 35 лет. Все это время проблема коллективной работы роботов была в центре внимания исследователей и разработчиков интеллектуальных информационных технологий. Это объясняется тем, что задачи в современных робототехнических системах стали более сложными, и усилий одного, отдельно взятого робота, не достаточно для решения таких технологических задач, как организация поведения мобильных роботов при решении задачи автоматизации складских помещений, а также формирование строя беспилотных летательных аппаратов при зондировании, мониторинге большой по площади местности. Поэтому для решения подобных задач необходимо задействовать большое количество однотипных (гомогенных) автономных мобильных роботов, образующих некоторую «стаю» или «рой», поведение которого соответствует требованиям поставленной задачи.

Наиболее ценным свойством стайного или роевого поведения, является высокая общая отказоустойчивость всей системы и высокая вероятность достижения глобальной цели. Данное свойство достигается за счет перераспределения ролей между роботами в случае выхода из строя одного или нескольких агентов роя.

Задача группового управления решается одним из двух способов. Первый из них основан на применение централизованного управления, основой которого является применение концепции «ведущий-ведомые». Второй подход предполагает использование децентрализованного или роевого поведения группы мобильных роботов.

Для построения локальных взаимодействий группы роботов возможны два вида децентрализованного управления: стайное и коллективное. Как первый, так и второй вид децентрализованного управления предполагает командное поведение роботов для достижения общей цели. Одним из новых направлений таких методов являются мультиагентные методы интеллектуальной оптимизации, базирующиеся на моделировании роевого интеллекта [1].

Методы роевого интеллекта [2], уже использующиеся для решения многих практических задач, могут применяться и для управления большими группами роботов, что привело к появлению отдельного направления, так называемой роевой робототехники [3].

Ряд исследований, посвященных задачам построения алгоритмов поведения группы роботов, базируются на использовании биоинспирированных подходов или подходов, основанных на использовании аналогий поведения живых существ, в частности колоний муравьев, пчел и других стайных животных [4]. В этом направлении за основу берутся модели биологических объектов (своего рода бионическая парадигма). Существует множество примеров стайного поведения насекомых и животных [5]. Считается, что получение адекватных моделей биологических систем позволит реализовать естественным образом и их стайное (роевое) поведение.

Так одним из подходов к построению биоинспирированных стратегий стайного поведения является применение методов агрегации роя роботов [6]. Из таких методов можно выделить метод виртуальных сил, основанный на вычислении сил, определяющих движение роботов относительно друг друга, учитывая местоположения окружающих объектов [7]. При этом следует отметить, что метод виртуальных сил не учитывает возникновение случайных событий (возникновение недетерминированных препятствий, как статических, так и динамических). Для преодоления данного недостатка применяется вероятностный подход, где поведение каждого отдельного робота имеет случайный характер и корректируется в процессе взаимодействия с окружающим пространством. [8]. Однако корректировка в режиме реального времени накладывает высокие требования на комплекс технических средств агента группы, что не всегда является реализуемым, в особенности, если речь идет о микро-роботах. Поэтому, этакой «золотой срединой» является применение эволюционных методов, которые позволяют агенту развиваться только тогда, когда он наследует знания от другого агента [9], что способствует распределению вычислений в группе роботов, тем самым снижая вычислительную нагрузку на одного, отдельно взятого робота.

Немаловажной задачей является осуществление навигации мобильного робота в ограниченном пространстве, в частности для решения задачи автоматизации складских помещений. Это обусловлено тем, что в настоящее время автоматизация складских помещений является неотъемлемой частью современного производства, так как склад является производственным участком, где происходит первый (важный) этап работы по выпуску конечного продукта и осуществляется его комплектация. На данный момент основным трендом рынка логистики и складского хозяйства является применение робототехнических комплексов для автоматизации складских помещений. Внедрение роботизированных систем хранения и автоматизация в целом являются достаточно дорогостоящими проектами, поэтому существуют ограничения на использование данных технологий повсеместно. Проекты роботизации складских помещений рассчитываются под каждый проект индивидуально с учетом региональных и производственных особенностей, что, в свою очередь увеличивает стоимость таких решений. Поэтому для решения данной проблемы исследователи, как в России, так и за ее пределами разрабатывают гибкие системы автоматизации складских помещений, основанные на применении роя однотипных роботов.

В настоящее время для решения задачи навигации мобильного робота в ограниченном пространстве применяются стратегии формирования оптимальной траектории при постоянно изменяющемся рабочем пространстве и учетом возможности возникновения коллизий [10]. В основу рассматриваемого решения вкладываются био-инспирированный метод поиска

«заряженной системы» (Charged System Search). Однако данный подход не учитывает возможность применения большого количества мобильных роботов (количество задействованных роботов ограничивается десятками), при котором возникают ситуации недетерминированного поведения группы ввиду высокой сложности представляемой системы. Преодоление данного недостатка возможно при применении метода, основанного на построении топологии окрестностей с использованием поиска k-ближайших соседей и учетом взвешенных расстояний [11]. Особенностью указанного метода является рассмотрение не только расстояния между роботами, но и плотности группы роботов, вычисляемой путем использования метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Предложенный алгоритм показал высокую эффективность в управлении роем роботов, позволив достигнуть самоорганизованной агрегации роя роботов с учетом присутствия и отсутствия препятствий на местности.

Таким образом, на сегодняшний день можно выделить следующие основные направления построения алгоритмов группового управления:

– Аналитические методы, основанные на построении формальных моделей и механизмов коллективного поведения.

– Технологии многоагентных систем.

– Методы имитационного моделирования, направленные на реализацию моделей взаимодействующих агентов.

– Биоинспирированные методы (пчелиные, муравьиные и др. алгоритмы), которые лежат в основе так называемого роевого интеллекта.

– Методы, основанные на реализации эволюционных механизмов взаимодействия внутри группы (эволюционные методы).

– Методы коллективной альтернативой адаптации автоматов.

Традиционно, в нашей стране в большей степени развиваются аналитические методы построении коллективного поведения роботов. Роевые алгоритмы, основанные на локальном взаимодействии множества однородных роботов (роя роботов), обеспечивают их скоординированное движение к цели, обход препятствий и т.д. [12]. В классической постановке стайного поведения каждый робот пытается достичь экстремума функционала самостоятельно, анализируя состояние среды функционирования. Стайные алгоритмы предполагают взаимодействие функционально разнородных роботов на основе их общих знаний о состоянии среды функционирования и индивидуальных правил поведения агентов в стае.

Особый интерес представляют автоматные модели. Основным тезисом являлось: любое достаточно сложное поведение слагается из совокупности простых поведенческих актов [13]. Яркими представителями этого направления являются ее основоположник М.Л. Цетлин, В.И. Варшавский, В.Л. Стефанюк, Д.А. Поспелов и др. В рамках коллективного поведения автоматов рассматривались задачи распределения ресурсов между участниками, особенности организации однородных коллективов, поведение неоднородных структур (вводился ранг рефлексии участников) и т.п. Решались также задачи синхронизации взаимодействия членов коллектива (автоматов). Некоторые разработанные подходы и методы до сих пор недооценены особенно применительно к задаче коллективного поведения роботов.

Предпринимались попытки создания различного рода комбинированных моделей командной работы агентов, которые объединяли бы достоинства рассмотренных моделей. Однако и комбинированные модели не предоставляют возможности динамического изменения плана и коллективной обработки непредвиденных ситуаций.

Также, немаловажными подходами к организации группового управления являются такие подходы как: метод оптимизации коллективного поведения [14, 15], метод искусственных потенциальных полей [16 – 20], эвристические методы [21 – 23], основанные на распознавании ситуации и выработки соответствующих действий и методы на основе применения нечеткой логики [24-27].

Метод оптимизации коллективного поведения, согласно работам [14, 15], основываются на проведении итерационной процедуры оптимизации коллективных действий агентов группы, причем и роботы, и среда, в которой они функционируют, представляет собой единую дискретную динамическую систему. Из основных недостатков данного подхода можно выделить процесс формировании адекватных оценок эффективности действий роботов группы, при котором должны быть учтены технические характеристики роботов, характеристика среды, а также особенности технологических задач выполняемых группой роботов. Однако, при наличии уже сформированных оценок эффективности действий каждого робота дальнейший алгоритм решения задачи значительно упрощается [15].

Применение метода потенциальных полей позволяет создавать не только системы управления одиночными мобильными роботами в среде с препятствиями [19], но системы группового управления мобильными роботами [16 – 18]. За счет того, что все объекты рабочей среды (препятствия, непроходимые участки и других роботов) наделяются виртуальными полями или искусственными потенциальными полями (объекты, которые должны сблизится наделяются «зарядами» противоположных знаков, объекты, которые не должны наделяются «зарядами» одного знака), то движение роботов группы определяется влиянием результирующих «сил» искусственными потенциальными полями. К недостаткам данного метода можно отнести необходимость аппроксимирования препятствия выпуклыми многоугольниками или окружностями [19], что в реальных условиях работы группы роботов может оказаться трудно реализуемым и негативно сказаться на общей эффективности формирования строя. Несмотря на недостатки, метод потенциальных полей, в настоящее время, активно развивается как в нашей стране, так и за рубежом [16 – 20]. Это обусловлено необходимостью небольшого количества вычислительной мощности бортового ЭВМ мобильного робота группы (относительно аналогичных алгоритмов) для реализации группового управления.

Для управления группой мобильных роботах в условиях недетерминированной среды применяются методы, основанные на распознавании ситуации и выработки соответствующих действий [21 – 23]. Для возможности эффективной реализации данных методов в памяти каждого робота группы должен хранится конечный набор рабочих ситуаций, а также соответствующий им набор поведенческих сценариев робота для достижения общей глобальной цел. Основным достоинством, такого «поведенческого» подхода является то, что он позволяет обеспечивать управление группой мобильных роботов в динамически изменяющейся рабочей среде. Недостатком, же данного подхода, является тот факт, что каждый робот группы должен распознавать текущую ситуацию и реализовать соответствующий ей сценарий действий, что возможно лишь в средах, где возникают лишь заранее изученные ситуации.

Для решения трудно формализуемых задач применяются методы и подходы, основанные на применение нечеткой логики. Задача формирования строя группой мобильных роботов не стала исключением. Нечеткая логика для формирования законов группового управления широко применяется в [24-27]. Следует отметить, что нечеткая логика применяются как для распределения задач между роботами, так и для синтеза законов управления агентов группы [26, 27].

Методы на основе нечеткой логики могут применяться при реализации централизованного подхода к групповому управлению, в частности стратегии управления «ведущий-ведомый» [23, 24]. При таком подходе формирование тактических стратегий для группы роботов возлагается на одного, ведущего робота, в то время как поведение остальных, ведомых, мобильных роботов группы (МРГ) определяется поведением ведущего. При централизованном подходе к групповому управлению мощным комплексом технических средств достаточно оснастить только ведущего мобильного робота, ведомые комплектуются минимальным набором оборудования, которое необходимо для выполнения задач, сформированных ведущим МРГ.

Основными недостатками применения нечеткой логики при формировании стратегии управления «ведущий-ведомый» является необходимость обработки большого объема исходной информации. На практике создание правил поведения для нечетких регуляторов осуществляется на интуитивной основе и, чаще всего, по аналогии с известными примерами. Значительную сложность представляет и проблема исследования устойчивости полученной замкнутой системы управления. Для анализа устойчивости системы управления с нечетким регулятором в большинстве случаев используется компьютерное моделирование.

Для реализации группового управления мобильными роботами немаловажным является учет математической модели и возможность аналитического доказательства области устойчивости полученной системы. Поэтому рассмотрим подробно использование принципов и методы синергетической теории управления для формирования стратегии группового управления, который позволяет аналитически синтезировать закон управления на основе математической модели с определением условий асимптотической устойчивости замкнутой системы.

Синергетика интегральная наука, изучающая процессы самоорганизации в том числе в технической сфере. Базируясь на знаниях о природе происходящих процессов в сложных нелинейных системах, была сформирована новая прикладная синергетическая теория управления [28 – 40], основанная на принципе направленной самоорганизации. В рамках данной теории был разработан метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [30], 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.

Синергетический синтез систем группового управления. Для примера в качестве мобильных роботов группы, рассмотрим малогабаритные мобильные гусеничные. 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 робот является нелинейным объектом управления [28, 29], то общая модель поведения группы роботов дополняется нелинейными составляющими динамики как самих МРГ, так и функциональных отношений между ними:

$$\begin{aligned}
\dot{x}^k &= V^k \cdot \cos\psi^k; \\
\dot{y}^k &= V^k \cdot \sin\psi^k; \\
\dot{V}^k &= \frac{u_1{}^k - R_t}{m}; \\
\dot{\psi}^k &= \omega^k; \\
\dot{\omega}^k &= \frac{-Bu_2{}^k}{2I_z} - \frac{M_r}{I_z},
\end{aligned} \qquad (1)$$

где x^k, y^k – координаты центра масс k-го робота группы; V^k – линейная скорость k-го робота; ψ^k – угол поворота k-го робота, $\omega_\psi{}^k$ – угловая скорость k-го робота; $u_1{}^k$, $u_2{}^k$ – каналы управления k-ым МРГ; m – масса робота; R_t – сопротивление внешней среды единое для каждого робота, B –

расстояние между центральными линиями гусениц робота, I_z - момент инерции робота, M_r – момент сопротивления повороту.

В СТУ совокупность критериев управления системы принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Исходя из того, что задачей управления является устойчивое передвижение группы роботов в заданную позицию в рабочем пространстве, то 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^*. Таким образом, подмножество целей для ведущего МРГ будет иметь вид:

$$\Sigma_1^1 = \left\{ x^1 = x^*, \quad y^1 = y^* \right\} \tag{2}$$

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

$$\Sigma_1^k = \left\{ x^k = x^1 + \Delta_x^k, \quad y^k = y^1 + \Delta_y^k \right\} \tag{3}$$

где Δ_x^k, Δ_y^k – коэффициенты смещения ведомых МРГ относительно ведущего, k – номер ведомого МРГ.

Для осуществления синтеза методом АКАР [21] выразим подмножества целей управления ведущего МРГ (2) через первую макропеременную:

$$\Psi_1^1 = \omega^1 + \mathrm{k}_1^1(\theta^1 - \theta_0^1), \tag{4}$$

где k_1^1 – положительная константа. Согласно методу синергетического синтеза законов управления, исходная задача разбивается на несколько иерархически связанных подзадач, в данном случае на задачу стабилизации угла поворота робота, что позволит решить задачу перемещения робота в пространстве. Макропеременная (4) при этом должна удовлетворять решению $\Psi_1{}^1 = 0$ системы основных функциональных уравнений (ОФУ):

$$\dot{\Psi}_1^1 + \lambda_1^1 \Psi_1^1 = 0, \tag{5}$$

где λ_1^1 – положительная константа.

Из данной системы уравнений (5) определяется «внешний» закон управления ведущего МРГ $u_2{}^1$. Далее, для непосредственного решения задачи перемещения робота в пространстве необходимо для декомпозированной модели

$$\dot{x}^1 = V^1 \cdot \cos\theta_0^1;$$

$$\dot{y}^1 = V^1 \cdot \sin\theta_0^1;$$

$$\dot{V}^1 = \frac{u_1{}^1 - R_t}{m},$$

ввести вторую макропеременную

$$\Psi_2^1 = V^1 - V_{\max}^1 \tanh(\phi^1),$$

где φ^1 – «внутренний» закон управления, $\mathrm{V}_{\max}^1$ – максимально допустимая скорость движения ведущего МРГ. Решением ОФУ

$$\dot{\Psi}_2^1 + \lambda_2^1 \Psi_2^1 = 0,$$

является «внешний» закон управления $u_1{}^1$. Для поиска оставшихся неизвестных системы (θ_0^1, φ^1) для декомпозированной системы

$$\dot{x}^1 = \phi^1 \cdot \cos\theta_0^1;$$

$$\dot{y}^1 = \phi^1 \cdot \sin\theta_0^1,$$

введем следующую совокупность макропеременных:

$$\Psi_3^1 = x^1 - x^*;$$
$$\Psi_4^1 = y^1 - y^*,$$

результатом решения ОФУ:

$$\dot{\Psi}_3^1 + \lambda_3^1 \Psi_3^1 = 0;$$
$$\dot{\Psi}_4^1 + \lambda_4^1 \Psi_4^1 = 0,$$

которых будут являться выражения для оставшихся неизвестных системы (θ_0^1, ϕ^1).

Далее, аналогичным способом, для осуществления слежения за ведущим МРГ, выразим подмножество целей управления ведомых МРГ (3) через следующие совокупности макропеременных:

$$\begin{aligned}
\Psi_1^k &= \omega^k + \mathrm{k}_1^{\mathrm{k}}(\theta^k - \theta_0^k);\\
\Psi_2^k &= V^k - V_{\max}^k \tanh(\phi^{\mathrm{k}}),\\
\Psi_3^k &= x^k - x^1 - \Delta_x^k;\\
\Psi_4^k &= y^k - y^1 - \Delta_y^k,
\end{aligned} \tag{6}$$

где $\mathrm{V}_{\max}^1$ – максимально допустимая скорость движения ведомых МРГ, $\mathrm{k}_1^{\mathrm{k}}$ – положительные константы.

Согласно методу АКАР [15-18], система макропеременных (6) должна удовлетворять решению $\Psi_i^k = 0$ (i = 1, 2, 3, 4) системы функциональных уравнений:

$$\dot{\Psi}_i^k + \lambda_i^k \Psi_i^k = 0, \text{ при } i = \overline{1,4}. \tag{7}$$

Решением системы функциональных уравнений (7) являются «внешние» законы управления ведомых МРГ u_1^k, u_2^k, а также вспомогательные переменные (θ_0^k, φ^{k}). В итоге поведение группы мобильных роботов на пересечении инвариантных многообразий $\Psi_i^1 = 0$ и $\Psi_i^k = 0$ (i = 1, 2, 3, 4) будет описываться следующей системой:

$$\begin{aligned}
\dot{x}^1 &= \lambda_3^1 (-x^1 + x^*); \qquad \dot{x}^k = \lambda_3^k (-x^k + x^1 + \Delta_x^k);\\
\dot{y}^1 &= \lambda_4^1 (-y^1 + y^*); \qquad \dot{y}^k = \lambda_4^k (-y^k + y^1 + \Delta_y^k),
\end{aligned} \tag{8}$$

из которой можно сделать вывод о том, что система будет устойчивой при выполнении условия

$$\lambda_3^1, \lambda_{34}^1, \lambda_3^k, \lambda_4^k > 0.$$

Таким образом, с учетом математической модели мобильного робота (1) и «внешних» управлений ведущего МРГ u_1^1, u_2^1 и ведомых МРГ u_1^k, u_2^k, можно получить стратегии группового управления реализующие централизованное поведение, слаженное движение ведомых МРГ относительно главного ведущего МРГ, перемещающегося в заданную точку рабочего пространства.

Компьютерное моделирование. Проведем компьютерное исследование синтезированной замкнутой системы группового управления роботами. Предположим, что задачу группового построения в пространстве выполняют один ведущий и четыре ведомых (k = 5) робота. Ограничим скорость перемещения ведущего МРГ порогом в V_0^1 = 5 м/с. Зададим целевые координаты ведущего МРГ следующим образом: x^* = 50 м, y^* = 50 м. Зададим ограничение скорости перемещения ведомых МРГ порогом в V_0^k = 10 м/с.

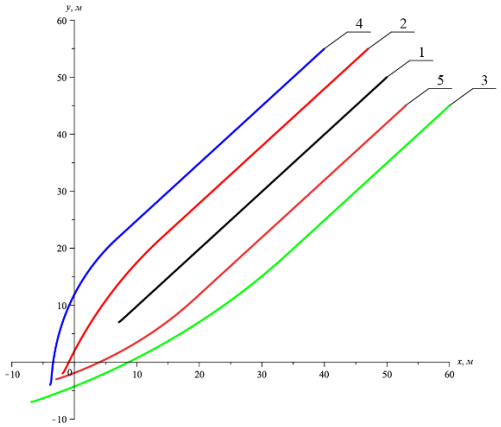


Рис. 1. Траектория движения группымобильных роботов

Предположим, что начальные условия проекций векторов линейной и угловой скоростей ведущего и ведомых МРГ являются нулевыми ($V^k(0) = 0$, $\omega^k(0) = 0$), масса робота m = 1 кг., расстояние между центральными линиями гусениц робота 20 см., а сопротивление внешней среды является заранее известным.

В качестве начальных значений положения роботов в рабочем пространстве возьмём следующие значения:

$$x^1(0) = 7, \quad y^1(0) = 7;$$

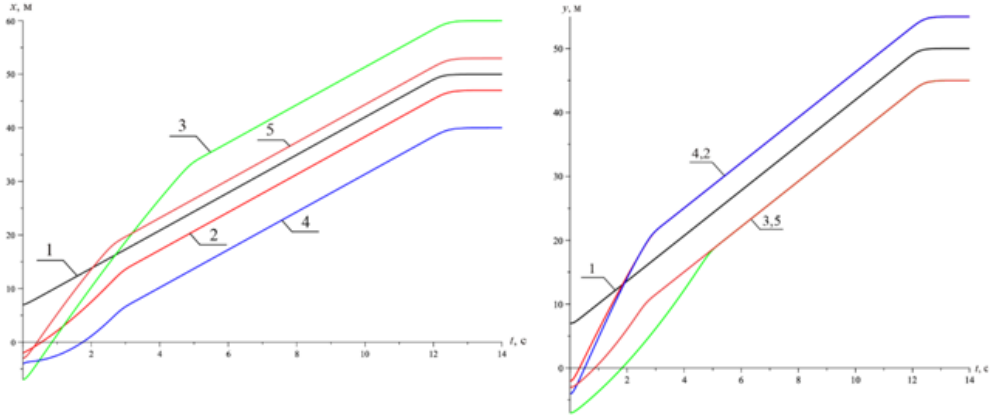
$$x^2(0) = -2, \quad y^2(0) = -2;$$

$$x^3(0) = -7, \quad y^3(0) = -7;$$

$$x^4(0) = -4, \quad y^4(0) = -4;$$

$$x^5(0) = -3, \quad y^5(0) = -3.$$

На рис. 1 – 3 представлены переходные процессы изменения координат полученной замкнутой системы. Обозначения на рисунках: 1 – ведущий МРГ; 2, 3, 4, 5 – ведомые МРГ.



а б

Рис. 2. Изменение проекции вектора перемещения группы роботов: а ось *x*; б ось *y*

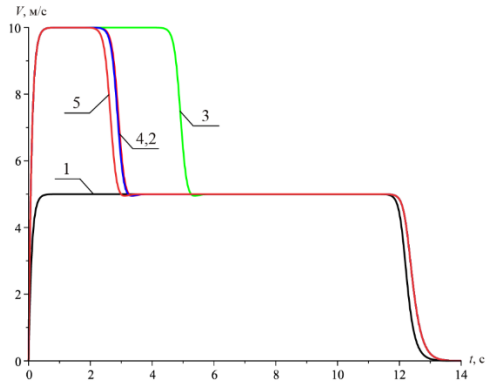


Рис. 3. Изменение вектора линейной скорости мобильных роботов группы

Представленные результаты моделирования подтверждают, что в синтезированной замкнутой системе управления группой роботов, с учетом (1) обеспечивается выполнение введенной системы инвариантов: передвижение ведущего МРГ к заданной точке (рис. 1), выдерживание ведомыми МРГ заданного смещения относительно ведущего МРГ (рис. 2), а также выполнения всеми МРГ ограничения по максимальной скорости перемещения (рис. 3).

Заключение.

Таким образом, в статье представлены современные методы синтеза законов группового управления движением группой мобильных роботов, а также детально рассмотрена процедура аналитического синтеза стратегии группового управления мобильными роботами с использованием полных нелинейных моделей движения. Указанная стратегия управления опирается на принципы синергетической теории управления и обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутых систем, и четкое исполнение заданных инвариантов. Использование нелинейных составляющих при синтезе законов группового управления позволяет точно выдерживать требуемое смещение ведомых роботов относительно положения ведущего. Вариация смещений ведомых МРГ позволяет формировать различные типы строя группы роботов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Городецкий В.И. Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии. // Робототехника и техническая кибернетика, №1 (10) 2016, С. 40-54

2. Dorigo M., Birattari M. Swarm intelligence //Scholarpedia. 2007. N 2(9)

3. Beni G. From Swarm Intelligence to Swarm Robotics //Swarm Robotics SAB 2004 International Workshop, Santa Monica, CA, USA, July 17, 2004, Revised Selected Papers (Lecture Notes in Computer Science Vol. 3342, 2005). Springer. P. 1—10

4. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие – М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014

5. Карпов В.Э. Управление в статических роях. Постановка задачи // Сб. научных трудов VII-й Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Коломна. 20-22 мая 2013. В 3-х томах. Т.2. М.: Физматлит. - С.730-739

6. Fetecau R C 2011.Collective behavior of biological aggregations in two dimensions: anon local kinetic model. Math. Models Methods Appl. Sci. 21(7) 1539–1569

7. Hackett-Jones E J, Landman K A, Fellner K 2012 Aggregation patterns from nonlocal interactions: discrete stochastic and continuum modeling. Phys. Rev. 85(4) 041912

8. Burger M, Haškovec J, Wolfram M T 2013 Individual based and mean-field modeling of direct aggregation. Physica D: Nonlinear Phenom. 260 145–158

9. Gomes J, Urbano P, Christensen A L 2013 Evolution of swarm robotics systems with novelty search. Swarm Intell. 7(2-3) 115–144

10. Radu-EmilPrecup, Emil M.Petriu, Mircea-BogdanRadae, Emil-IoanVoisan, FlorinDragan, Adaptive Charged System Search Approach to Path Planning for Multiple Mobile Robots// IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 10, 2015, Pages 294-299

11. Belkacem Khaldi, Fouzi Harrou, Foudil Cherif, Ying Sun, Self-organization in aggregating robot swarms: A DW-KNN topological approach //Biosystems, Volume 165, March 2018, Pages 106-121

12. Павловский В.Е., Кирикова Е.П. Моделирование управляемого адаптивного поведения гомогенной группы роботов // Искусственный интеллект. 2002, № 4, с. 596-605.

13. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.:Наука,1969. 316с.

14. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. - М.: Физматлит, 2009. – 278 с.

15. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. - М.: Янус-К, 2002. - 292 с.

16. 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.

17. Рыжова Т.П. Управление коллективом мобильных роботов // Труды международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника". - 2011. - С. 281-287.

18. GaziV. Swarm Aggregations Using Artificial Potentials and Sliding Mode Control // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. Maui, Hawaii, 2003.-P. 2041-2046.

19. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы//Препринт института прикладной математики имени М.В. Келдыша. 2001. №1. С. 1-32.

20. Bennet Derek J., Mclnnes Colin R. Distributed control of multi-robot systems using bifurcating potential fields//Robotics and Autonomous Systems. 2010. №58. P. 256-264.

21. Fierro R., Das A., Spletzer J., Esposito J., Kumar V., Ostrowski J. et al. A Framework and Architecture for Multi-Robot Coordination // Intern. J. of Robotics Research. - 2002. - Vol. 21, № 10-11. - P. 977-995.

22. Nicolescu M., Mataric M. Experience-based representation construction: learning from human and robot teachers // Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems. - 2001. - Vol. 2. - P. 740-745.

23. Parker L. Alliance: An Architecture for Fault Tolerant Multi-Robot Cooperation // IEEE Transactions on Robotics and Automation. - 1998. - Vol. 14, № 2. - P. 220-240.

24. Bazoula A., Djouadi M., Maaref H. Formation Control of Multi-Robots via Fuzzy Logic Technique // Intern. J. of Computers, Communications & Control. -2008.-Vol.3.-P. 179-184.

25. Bazoula A., Maaref H. Fuzzy Separation Bearing Control for Mobile Robots Formation // Intern. J. of Aerospace and Mechanical Engineering. - 2007. -P. 14-19

26. Benbouabdallah K., Qi-dan Z. A Fuzzy Logic Behavior Controller for a Mobile Robot Path Planning in Multi-obstacles Environment // Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology. — 2013. — Vol. 5(14). -P. 3835-3842.

27. Bemian S., de Oliveira M., Edan Y., Jamshidi M. Hierarchical Fuzzy Behavior-Based Control of a Multi-Agent Robotic System // Proc. of the 7 l Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED). - 1999. - P. 2024-2032.

28. Скляров А.А., Скляров С.А, Синергетическое управление мобильным роботом с гусеничным шасси //Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 6 (119). С. 118-125.

29. Веселов Г.Е. Скляров А.А, Скляров С.А., Синергетический подход к управлению траекторным движением мобильных роботов в среде с препятствиями// Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 7. С. 20-25.

30. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

31. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития// Изве-стия ТРТУ. 2001. – Т. 23. – № 5. – С. 7-27.

32. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганиза-ции и управления// Известия ТРТУ. 2006. – Т. 61. –№ 6. – С. 10-38.

33. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Мушенко А.С. и др. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – М.: КомКнига, 2006. – 304 с.

34. Веселов Г.Е. Синергетический подход к синтезу иерархических систем управления// Известия ТРТУ. 2006. –Т. 61. –№ 6. –С. 73-84.

35. Веселов Г.Е. Прикладная теория синергетического синтеза иерархических систем управления// Изве-стия ТРТУ. Тематический выпуск. Прикладная синергетика и системный синтез. –2006. –№5. –С. 66–76.

36. Веселов Г. Е., Скляров А. А., Скляров С. А. Синергетический подход к управлению беспилотным лета-тельным аппаратом//Известия Южного федерального университета. Технические науки. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. - №5 -С. 65–70.

37. G.E. Veselov, A. N. Popov, I. A. Radionov, “Synergetic control of asynchronous electric traction drives of locomotives”, Journal of Computer and Systems Sciences International, vol. 53, Issue 4, July 2014, pp. 587–600.

38. A.A. Kolesnikov, “Introduction of synergetic control,” Proc. American Control Conference (ACC-2014), Portland, OR, USA, 4-6 June 2014, pp. 3013-3016, doi: 10.1109/ACC2014.6859397.

39. G.E. Veselov, A.N. Popov, I.A. Radionov, A.S. Mushenko, “Adaptive Power Saving Control for Traction Asynchronous Electrical Drive: Synergetic Approach,” Proc. IEEE International Energy Conference (EnergyCon 2014), Dubrovnik, Croatia, 13-16 May 2014, pp. 1446-1453, doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850613

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-41-50

Попов Андрей Николаевич

Южный федеральный университет

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОМОБИЛСЯ *

Аннотация. *В статье рассматриваются вопросы синтеза регуляторов для систем векторного управления асинхронным двигателем, работающим в составе силовой установки электромобиля. Представлены процедуры синергетического синтеза алгоритмов векторного управления, обеспечивающих заданную скорость движения электромобиля при минимизации суммарных потерь в двигателе и минимизации тока статора. Теоретические выводы подтверждаются компьютерным моделированием замкнутых систем. Проводится анализ энергетической эффективности силовой установки электромобиля с предложенными алгоритмами управления.*

Ключевые слова: *силовая установка электромобиля, системы векторного управления асинхронным двигателем, синергетический синтез регуляторов.*

Annotation. *In the paper questions of synthesis of regulators for field-oriented control of the induction motor of the electric vehicle propulsion system are considered. Procedures of synergetic synthesis of the algorithms of vector control providing the specified vehicle speed at minimization of total losses in the motor and minimization of current of the stator are submitted. Theoretical conclusions are confirmed by computer modeling of the closed loop systems. The analysis of power efficiency of the electric vehicle propulsion system with the offered control algorithms is carried out.*

Keywords: *propulsion system of the electric vehicle, field-oriented control of the induction motor, synergetic synthesis of regulators*

Введение

Возрастающие энергетические и экологические вызовы заставляют автопроизводителей уделять все большее внимание вопросам разработки автомобилей с электрической или гибридной силовой установкой. По прогнозам Международного энергетического агентства, мировой парк электромобилей к 2025 году увеличится практически в 200 раз, т.е. достигнет 200 млн. единиц.

Ядро силовой установки любого электромобиля – тяговый электрический привод, преобразующий бортовую электроэнергию в движение транспортного средства. По сравнению с приводами промышленного применения приводы электромобилей должны удовлетворять следующим дополнительным требованиям [1]:

– высокий удельный момент и высокая удельная мощность;

– широкий диапазон регулирования скорости, включающий режимы «ползучей» скорости в пробах и высокоскоростное движение по автомагистралям;

– высокая эффективность в широком диапазоне изменения крутящего момента и скорости двигателя;

– высокий крутящий момент при разгоне и преодолении подъемов.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по гранту № 18-08-0924

Обеспечение указанных требований осуществляется посредством соответствующей микропроцессорной системы управления, являющейся неотъемлемой и важнейшей частью тягового привода электромобиля. Это система на основании текущей ситуации и требуемых характеристик движения, в режиме реального времени рассчитывает сигналы управления для электрических силовых преобразователей (инверторов и DC/DC конверторов), которые в свою очередь формируют необходимые напряжения на обмотках электродвигателя. В электромобилях в основном используются двигатели переменного тока – асинхронные с короткозамкнутым ротором и синхронные с постоянными магнитами. Поэтому задача системы управления сводится к выработке управляющих воздействий для автономного инвертора с ШИМ, который преобразует постоянной напряжение системы энергообеспечения (батареи, суперконденсатора, топливного элемента) в переменное напряжение заданной амплитуды и частоты, подаваемое на статорную обмотку двигателя.

Применительно к асинхронному электроприводу выделяют следующих три принципа управления [1], [2].

1. Частотное (скалярное) управление, при котором поддерживается заданное соотношение между амплитудой U_1 и частотой f_1 напряжения статора, в простейшем случае – $U_1 / f_1 = \text{const}$. В иностранной литературе – VVVF (variable-voltage variable-frequency).
2. Векторное или полеориентированное управление (ПОУ). В иностранной литературе – FOC (field-oriented control).
3. Прямое управление моментом. В иностранной литературе – DTC (direct torque control).

Наибольшее распространение в практике проектирования систем управления асинхронным электроприводом, в том числе и тяговым, получил принцип ПОУ, предложенный F. Blaschke [3] и реализованный фирмой Siemens в системе Transvector [4]–[5].

В системах ПОУ используется математическая модель асинхронного двигателя в системе координат, вращающейся синхронно с магнитным полем и ориентированной по вектору потокосцепления ротора. Такая модель позволяет использовать подходы к синтезу системы управления, успешно применяемые при управлении двигателем постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТНВ). Управление ведется по двум ортогональным проекциям тока статора i_{sx} и i_{sy}. Первая отвечает за формирование заданного потокосцепления ротора (аналог тока возбуждения ДПТНВ), вторая – за формирование электромагнитного момента (аналог тока якоря ДПТНВ).

Классическая система ПОУ представляет собой двухканальную систему управления – канал управления потокосцеплением и канал управления моментом (скоростью). Каждый канал реализует принцип подчиненного регулирования координат и содержит два контура с ПИ-регуляторами. Таким образом, структура системы управления является линейной и неизменной, а синтез сводится к выбору параметров ПИ-регуляторов [5].

Следует, однако, заметить, что в отличие от ДПТНВ, где разделение каналы управления носит физический характер (две независимые обмотки), каналы управления в системах ПОУ являются связанными, а их разделение и независимое рассмотрение, по всей видимости, обусловлено желанием разработчиков применить апробированные подходы и типовые регуляторы. В этой связи, в структуру систем ПОУ вводятся дополнительные блоки развязки каналов управления и разрабатываются различные методики расчета параметров ПИ-регуляторов, компенсирующих взаимовлияние каналов управления и естественную обратную связь по ЭДС двигателя [4], [5]. Естественно, это не может не сказываться на точности и эффективности системы управления и ограничивает область ее устойчивости.

В работах научной школы кафедры синергетики и процессов управления Южного федерального университета [6]–[9] предлагается отойти от типовой структуры системы ПОУ и синтезировать алгоритмы векторного управления АД на основе исходной нелинейной модели.

Такие алгоритмы будут естественным образом учитывать все указанные особенности АД как объекта управления. Кроме того, при использовании этого подхода появляются дополнительные возможности в плане повышения эффективности процесса электромеханического преобразования энергии.

В данной статье изложен общий подход к синергетическому синтезу регуляторов для систем ПОУ АД. Представлены процедуры синтеза классического векторного регулятора, стабилизирующего скорость и потокосцепление ротора, энергосберегающего регулятора и регулятора, минимизирующего ток статора.

1. Математическая модель и постановка задачи синтеза

Для синтеза алгоритмов управления для систем ПОУ используется известная математическая модель АД в координатной системе xy, вращающейся синхронно с магнитным полем и ориентированной по вектору потокосцепления обмотки ротора:

$$\begin{aligned}
&\frac{d\omega}{dt} = a_1\psi_r i_{sy} - a_2 M_l;\\
&\frac{d\psi_r}{dt} = a_3 i_{sx} - a_4\psi_r;\\
&\frac{di_{sx}}{dt} = -a_5 i_{sx} + a_4 a_6\psi_r + a_7\omega i_{sy} + a_3\frac{i_{sy}^2}{\psi_r} + b_1 u_{sx};\\
&\frac{di_{sy}}{dt} = -a_5 i_{sy} - a_6 a_7\omega\psi_r - a_7\omega i_{sx} - a_3\frac{i_{sx} i_{sy}}{\psi_r} + b_1 u_{sy}.
\end{aligned} \qquad (1)$$

Здесь и далее: u_{sx}, u_{sy} и i_{sx}, i_{sy} – проекции напряжения и тока статора на оси системы координат; ψ_r – модуль вектора потокосцепления ротора, ω – угловая скорость ротора, M_l – момент сопротивления нагрузки на валу двигателя, J – момент инерции, p – количество пар полюсов обмотки статора L_s, L_r, L_m – собственные и взаимная индуктивности обмоток, а r_s, r_r – их активные сопротивления. Коэффициенты модели связаны с параметрами обмоток электрической машины следующим образом:

$$a_1 = \frac{3pL_m}{2JL_r},\ a_2 = \frac{1}{J},\ a_3 = \frac{r_r L_m}{L_r},\ a_4 = \frac{r_r}{L_r},\ a_5 = \frac{r_r L_m^2 + r_s L_r^2}{L_r(L_s L_r - L_m^2)},$$

$$a_6 = \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2},\ a_7 = p\ ,\ b_1 = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2}.$$

Момент сопротивления нагрузки представляет собой сумму всех моментов, приложенных к валу двигателя и обусловленных действием внешних сил, которые возникают при движении электромобиля.

Движения электромобиля по наклонной дороге описывается дифференциальным уравнением [10]:

$$m_v\frac{dV_v}{dt} = F_t - F_{aero} - F_{roll} - m_v g\sin\alpha \qquad (2)$$

где m_v – масса электромобиля, а V_v – его скорость, F_t – сила тяги, возникающее при сцеплении ведущих колес с дорогой и создаваемая электродвигателем, F_{aero} – аэродинамическая сила, F_{roll} – сила трения качения, g – ускорение свободного падения, α – угол наклона дороги.

Аэродинамическая сила вычисляется как $F_{aero} = 0{,}5\rho C_d A_F (V_v + V_{wind})^2$, где ρ – плотность воздуха, C_d – коэффициент аэродинамической силы, A_F – площадь лобового обтекания, V_{wind} – скорость ветра.

Сила сопротивления качению обычно пропорционально нормальной силе и вычисляется как $F_{roll} = k_{roll} m_v g \cos\alpha$, где k_{roll} – коэффициент трения качения.

Сила тяги F_t основана на трении, которое пропорционально скольжению между колесом и дорожным покрытием. Величина этой силы определяется произведением нормальной силы на функцию скольжения. В большинстве случаев эту функцию можно считать линейной, а силу тяги вычислять как $F_t = \mu_s s_x m_v g \cos\alpha$, где μ_s – коэффициент трения скольжения, $s_x = (R_w\omega_w - V_v)/(R_w\omega_w)$ – относительное скольжение, R_w – радиус колес, ω_w – угловая скорость вращения колес.

С учетом изложенного момент сопротивления нагрузки на валу двигателя можно представить как функцию его угловой скорости $M_l = a_{m0} + a_{m1}\omega + a_{m2}\omega^2$, коэффициенты которой рассчитываются на основании приведенных выражений для внешних сил, передаточного числа редуктора k_{red} и коэффициента вязкого трения k_{fr} следующим образом:

$$a_{m0} = \frac{R_w}{k_{red}}\left(k_{roll} mg\cos\alpha + mg\sin\alpha\right),\ a_{m1} = k_{fr},\ a_{m2} = k_{aero}\frac{R_w^3}{k_{red}^3}(1-s_x)^2.$$

Задача синтеза регулятора для систем ПОУ формулируется как задача нахождения функций, определяющих математическую связь между текущими значениями переменных состояний и текущими значениями управляющих воздействий, т.е. функций $u_{sx} = u_{sx}(\omega, i_{sx}, i_{sy}, \psi_r)$ и $u_{sy} = u_{sx}(\omega, i_{sx}, i_{sy}, \psi_r)$. Эти функции фактически определяют структуру векторного регулятора как совокупность обратных связей, обеспечивающих выполнение задач управления АД.

Стандартной задачей управления АД в составе тяговой установки является задача стабилизации угловой скорости: $\omega = \omega^*$. Заданное значение угловой скорости ω^* может быть рассчитано на основе заданного значения скорости движения электромобиля V_v^* из установившегося режима уравнения (2):

$$\omega^* = \frac{k_{red} V_v^*}{R_w\left(1 - \frac{k_{aero} V_v^{*2}}{\mu_s mg\cos\alpha} - \frac{k_{roll}}{\mu_s} - \frac{\mathrm{tg}\,\alpha}{\mu_s}\right)}$$

В традиционных системах ПОУ второй задачей управления является задача стабилизации потокосцепления ротора в номинальном значении $\psi_r = \psi_{r\,nom}$. Однако поддержание номинального потока при малом значении крутящего момента приводит к существенному уменьшению КПД двигателя.

Исследованию вопросов повышения энергетической эффективности электромеханического преобразования в АД посвящено большое количество исследований. В [4], [11] показано, что при выполнении определенных условий возможна минимизация уровня энергетических потерь в асинхронном двигателе при изменении его скоростного режима и момента нагрузки на его валу. Эти условия, записанные в математической форме и представляющие собой некоторые соотношения, определенным образом связывающие переменные модели АД (1) и характеризующие режим минимальных потерь энергии, в работах [6], [7], [12], [13] названы энергетическими инвариантами.

Энергетические инварианты устанавливают оптимальное с точки зрения минимума потерь энергии значение одной из электромагнитных переменных модели (1) и имеют следующий вид:

$$\psi_r^{opt} = M_c^{0,5}\left(\frac{k_1}{k_2 + k_3\omega^{\beta}}\right)^{0,25},$$
$$i_{sx}^{opt} = \frac{M_c^{0,5}}{L_m}\left(\frac{k_1}{k_2 + k_3\omega^{\beta}}\right)^{0,25},\ i_{sy}^{opt} = \frac{2L_r M_c^{0,5}}{3pL_m}\left(\frac{k_2 + k_3\omega^{\beta}}{k_1}\right)^{0,25}, \quad (3)$$

где $k_1 = \frac{4\left(r_s L_r^2 + r_r L_m^2\right)}{3p^2 L_m^2}$, $k_2 = \frac{3r_s}{L_m^2}$, $k_3 = \frac{\Delta P_{st.nom}}{314^{\beta}\psi_{r\,nom}^2}$, $\Delta P_{st.nom}$ – номинальное значение потерь в стали, $\beta \approx 1,2$ – коэффициент, зависящий от марки стали.

Вывод КПД асинхронного двигателей при соблюдении одного из приведенных энергетических инвариантов, проводимый на основе очевидных аналитических выкладок, позволяет сделать вывод, что КПД не зависит от момента сопротивления нагрузки. Таким образом, для минимизации потерь энергии необходимо постоянно поддерживать одно из соотношений (3) при управлении АД.

В работе [14] предложен вариант управления для систем ПОУ, минимизирующий ток статора АД, названный авторами стратегией максимального крутящего момента на ампер (Maximum Torque per Ampere – MTPA) и нашедший свое применение в различных электроприводах, в том числе и тяговых. Условием MTPA является такое управление, при котором выполняется условие равенства проекций тока статора $i_{sx} = i_{sy}$. Из этого условия рассчитываются уставки для регуляторов системы ПОУ.

2. Процедуры синергетического синтеза векторных регуляторов для систем ПОУ АД

Основной идеей методов синергетического синтеза является формирование в пространстве состояний замкнутой системы «объект-регулятор» притягивающих инвариантных многообразий (ИМ), на пересечении которых находится желаемый стационарный режим [15], [16]. Введение «нужных» инвариантных многообразий представляет ключевой момент всей процедуры метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) и в каждом случае представляет собой нетривиальную задачу. В случае многомерных объектов инвариантные многообразия задаются в общем виде, а структура их доопределяется в ходе процедуры синтеза на основе принципа поэтапной динамической декомпозиции исходной системы. Оставляя за рамками статьи методологические тонкости, можно отметить, что инвариантные многообразия формируются исходя из целей управления – инвариантов системы и структуры правых частей дифференциальных уравнений ее математической модели.

Специфика синергетического синтеза алгоритмов векторного управления асинхронным электроприводом подробно изложена в [7]–[9]. Рассмотрим общие аспекты процедуры синтеза векторных регуляторов для ПОУ АД.

Структура математической модели АД определяет общую стратегию синергетического синтеза. Управляющие воздействия u_{sx} и u_{sy} входят в правые части третьего и четвертого уравнений (1) и, следовательно, определяют динамику проекций тока статора i_{sx} и i_{sy}. В этой связи, ИМ (их число равно числу каналов управления) целесообразно задавать в общем виде:

$$\psi_1 = i_{sx} - \varphi_1 = 0,$$
$$\psi_2 = i_{sy} - \varphi_2 = 0, \quad (4)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – пока неизвестные функции, которые аналогичны желаемым значениям проекций тока статора в традиционных системах ПОУ АД i_{sx}^* и i_{sy}^*.

На пересечении ИМ, когда $i_{sx} = \phi_1$ и $i_{sy} = \phi_2$, динамика объекта описывается уравнениями декомпозированной системы:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= a_1 \psi_r \phi_2 - a_2 M_l; \\ \frac{d\psi_r}{dt} &= a\phi_1 - a_4 \psi_r. \end{aligned} \tag{5}$$

В модели (5) функции φ_1 и φ_2 можно рассматривать как «внутренние» управления и продолжить процедуру синтеза, задав «внутренние» ИМ, определяющие желаемый стационарный режим скорости и потокосцепления ротора. Если ставится задача стабилизации этих переменных в некотором значении, то эти ИМ имеют простой и очевидный вид:

$$\begin{aligned} \psi_3 &= \omega - \omega^* = 0, \\ \psi_4 &= \psi_r - \psi_r^* = 0. \end{aligned} \tag{6}$$

Пересечением многообразий $\psi_3 = 0$ и $\psi_4 = 0$ является точка в пространстве состояний замкнутой системы, соответствующая желаемому стационарному режиму.

Функции ϕ_1 и ϕ_2 находятся из решения системы функциональных уравнений метода АКАР $T_i \dot{\psi}_i + \psi_i = 0, i = 3,4$ в силу модели (5). ИМ $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$ приобретают конкретный вид, а искомый закон управления ищется из решения системы уравнений $T_i \dot{\psi}_i + \psi_i = 0, i = 1,2$ в силу модели (1).

Следует заметить, что процедура синергетического синтеза имеет каскадный характер. Прослеживается явная аналогия с традиционной схемой ПОУ АД. Два канала управления, в каждом канале два контура, один из которых является подчиненным другому: структура $\psi_1 = 0$ определена заданием $\psi_4 = 0$ (потокообразующий канал), структура $\psi_2 = 0$ определена заданием $\psi_3 = 0$ (моментообразующий канал). Но в отличие от традиционной схемы, каналы управления связаны, их нелинейное взаимодействие отражено в алгоритме векторного управления. Коэффициенты регулятора $T_i > 0$ определяют время переходных процессов. При необходимости компенсации различных возмущений и повышения робастности замкнутой системы, нужно ввести в каждый канал интегратор, а процедуру синтеза проводить на основе принципа интегральной адаптации [7], [8], [16].

Рассмотрим применение изложенного подхода для синтеза различных регуляторов для систем ПОУ АД.

Традиционное управление: стабилизация скорости и потокосцепления ротора

Структуру ИМ $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$ в принципе можно задать сразу, а процедуру синтеза сделать одноэтапной. Если ИМ задавать как

$$\begin{aligned} \psi_1 &= a_3 i_{sx} - a_4 \psi_r - l_1(\psi_r - \psi_r^*) = 0, \\ \psi_2 &= a_1 \psi_r i_{sy} - a_2 M_l - l_2(\omega - \omega^*) = 0, \end{aligned} \tag{7}$$

то на их пересечении получим модель декомпозированной системы:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= l_2(\omega - \omega^*), \\ \frac{d\psi_r}{dt} &= l_1(\psi_r - \psi_r^*). \end{aligned}$$

Очевидно, что при $l_1, l_2 > 0$ будет обеспечена асимптотическая устойчивость относительно состояния $\omega = \omega^*$, $\psi_r = \psi_r^*$.

Алгоритм векторного управления ищется из решения $T_i\dot{\psi}_i+\psi_i=0, i=1,2$ в силу модели (1) и имеет следующий вид:

$$u_{sx}=\frac{1}{b_1}\left((a_5+a_4+l_1-\frac{1}{T_1})i_{sx}-a_4a_6\psi_r-a_7\omega i_{sy}-a_3\frac{i_{sy}^2}{\psi_r}-\frac{a_4}{a_3}(a_4+l_1+\frac{1}{T_1})\psi_r+\frac{l_1(\psi_r-\psi_r^*)}{a_3T_1}\right),$$

$$u_{sy}=\frac{1}{b_1}\left(\begin{array}{l}(a_5+a_4-\frac{a_1}{T_2}+a_2l_2+a_2\frac{\partial M_l}{\partial\omega})i_{sy}+a_6a_7\omega\psi_r+a_7\omega i_{sx}+\\ (a_1a_2-T_2a_2^2l_2-T_2a_2^2\frac{\partial M_l}{\partial\omega})M_l+l_2(\omega-\omega^*)\\ +\frac{}{a_1\psi_rT_2}.\end{array}\right) \quad (8)$$

Энергосберегающее управление: стабилизация скорости и минимизация потерь энергии

Синтез энергосберегающего регулятора можно проводить на основе обобщенной процедуры, задавая на втором этапе $\psi_4=\psi_r-\psi_r^{opt}=0$, где ψ_r^{opt} определяется из выражения для соответствующего энергетического инварианта из (3). С другой стороны, процедуру можно упростить и сделать одноэтапной, если задать ИМ:

$$\begin{aligned}\psi_1&=i_{sx}-\frac{\left|M_c^*\right|^{0,5}}{L_m}\left(\frac{k_1}{k_2+k_3\left|\omega^*\right|^{\beta}}\right)^{0,25}=0\\ \psi_2&=i_{sy}-\frac{a_2\left|M_c^*\right|^{0,5}}{a_1}\left(\frac{k_2+k_3\left|\omega^*\right|^{\beta}}{k_1}\right)^{0,25}=0.\end{aligned} \quad (9)$$

Эти ИМ соответствуют энергетическим инвариантам из (3), в которых вместо угловой скорости и момента сопротивления нагрузки присутствуют их значения в заданном режиме работы ω^* и M_c^*. Технологический инвариант $\omega=\omega^*$ также входит в структуру ИМ, но «скрытым» образом – в виде заданного значения угловой скорости.

При задании ИМ в форме (9), получается следующий энергосберегающий регулятор для систем ПОУ АД:

$$\begin{aligned}u_{sx}&=\frac{1}{b_1}\left(a_5i_{sx}-a_4a_6\psi_r-a_7\omega i_{sy}-a_3i_{sy}^2/\psi_r-\frac{1}{T_1}\left(i_{sx}-\lambda_1\left|M_c^*\right|^{0,5}/L_m\right)\right),\\ u_{sy}&=\frac{1}{b_1}\left(a_5i_{sy}+a_6a_7\omega\psi_r+a_7\omega i_{sx}+a_3i_{sx}i_{sy}/\psi_r-\frac{1}{T_2}\left(i_{sy}-a_2\lambda_1^{-1}\left|M_c^*\right|^{0,5}/a_1\right)\right).\end{aligned} \quad (10)$$

где $\lambda_1=\left(k_1/\left(k_2+k_3\left|\omega^*\right|^{\beta}\right)\right)^{0,25}$.

Управление по стратегии МТРА

Для реализации стратегии МТРА необходимо обеспечить выполнение условия равенства проекций статора. В этом случае инвариантами системы будут $i_{sx}=i_{sy}$ и $\omega=\omega^*$. Выполнение этих инвариантов будет достигнуто, если задать ИМ вида:

$$\begin{aligned}\psi_1&=i_{sy}-i_{sx}=0,\\ \psi_2&=a_1L_mi_{sy}^2-a_2M_l-l_2(\omega-\omega^*)=0.\end{aligned} \quad (11)$$

На многообразии $\psi_1=0$ будет выполнено условие МТРА. Учитывая, что $\psi_r=L_mi_{sx}$, можно убедиться, что на пересечении инвариантных многообразий динамика скорости ротора

будет описываться дифференциальным уравнением $\frac{d\omega}{dt} = l_2(\omega - \omega^*)$, обладающим свойством асимптотической устойчивости относительно состояния $\omega = \omega^*$ при $l_2 < 0$.

Алгоритм векторного управления, соответствующий (11):

$$u_{sx} = u_{sy} + \frac{1}{b_1}\begin{pmatrix} -a_6 a_7 \omega \psi_r - a_7 \omega\left(i_{sx} + i_{sy}\right) - a_3 \dfrac{i_{sx} i_{sy}}{\psi_r} - \\ -a_4 a_6 \psi_r - a_3 \dfrac{i_{sy}^2}{\psi_r} + \left(\dfrac{1}{T_1} - a_5\right)\left(i_{sy} - i_{sx}\right) \end{pmatrix},$$

$$u_{sy} = \frac{1}{b_1}\begin{pmatrix} (a_5 - \dfrac{1}{2T_2}) i_{sy} + a_6 a_7 \omega \psi_r + a_7 \omega i_{sx} + a_3 \dfrac{i_{sx} i_{sy}}{\psi_r} + \\ \dfrac{1}{2a_1 L_m i_{sy}} (a_2 \dfrac{\partial M_l}{\partial \omega} + l_2)(a_1 \psi_r i_{sy} - a_2 M_l) + \dfrac{1}{2a_1 L_m i_{sy} T_2}\left(a_2 M_l + l_2(\omega - \omega^*)\right) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

3. Компьютерное моделирование

Для оценки эффективности синтезированных алгоритмов управления было проведено компьютерное моделирование замкнутых систем ПОУ с различными векторными регуляторами. При моделировании использовались параметры и номинальные данные двигателя 4А250 М4 [17] и параметры электромобиля Nissan Leaf.

На рис. 1 – 6 представлены переходные процессы основных переменных АД при разгоне электромобиля до скорости 80 км/ч. Графики синего цвета соответствуют традиционному управлению с номинальным потоком (8), красного цвета – энергосберегающему управлению (10), оранжевого цвета – управлению по стратегии МТРА (12). Параметры регуляторов задавались идентичными: $T_1 = T_2 = 0,01$, $l_1 = l_2 = -2$.

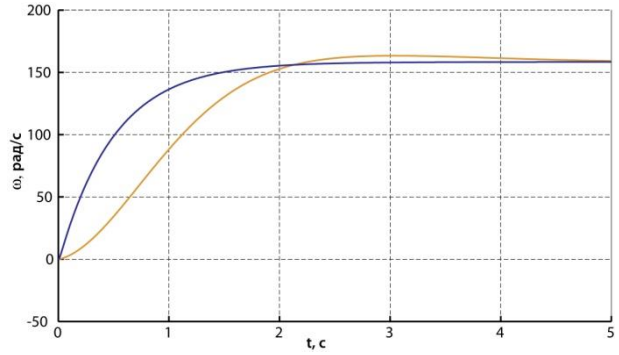


Рис.1. Переходные процессы угловой скорости АД

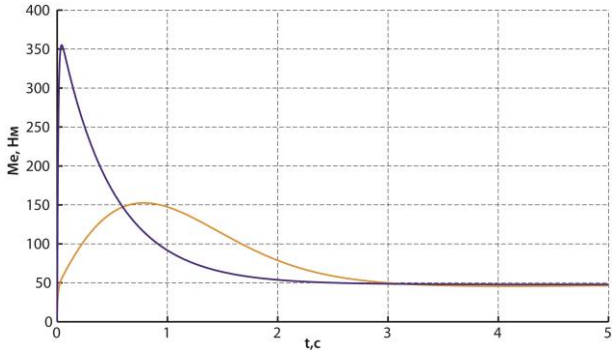


Рис.2. Переходные процессы электромагнитного момента

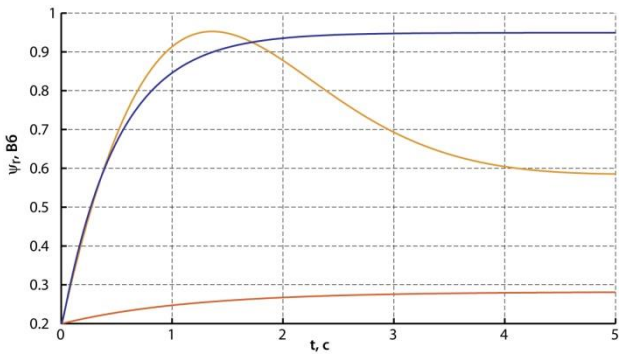


Рис.3. Переходные процессы модуля

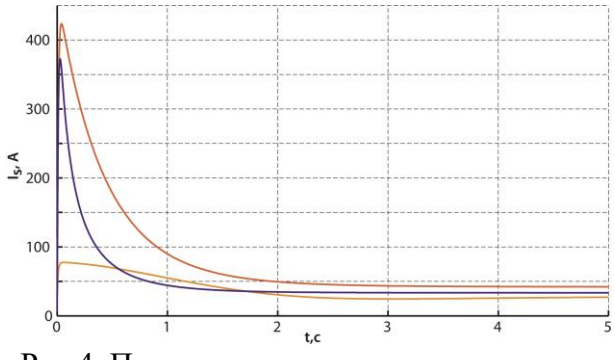


Рис.4. Переходные процессы тока статора

потокосцепления ротора

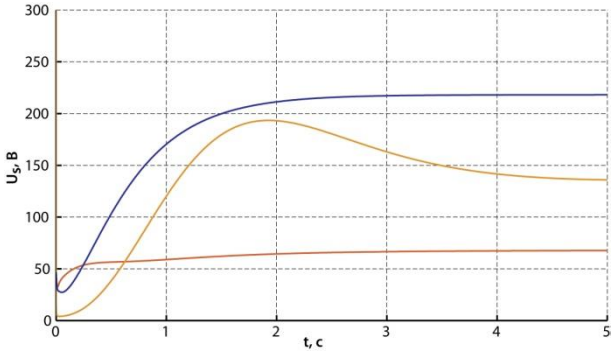


Рис.5. Переходные процессы действующего значения напряжения статора

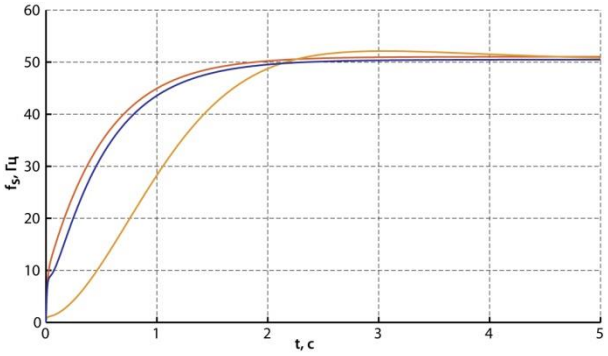


Рис.6. Переходные процессы частоты напряжения статора

Анализируя результаты моделирования, можно обратить внимание, что переходные процессы скорости и момента при традиционном и энергосберегающем управлениях совпадают, а при управлении МТРА имеют более затяжной характер с характерным перерегулированием. Из рис. 4 видно, что стратегия МТРА действительно обеспечивает минимизацию тока статора и ограничивает бросок тока при начале движения электромобиля. При энергосберегающем управлении потокосцепление ротора устанавливается в значение, соответствующее минимальным потерям в АД в данном режиме движения, что выражается также в соответствующем значении напряжения статора.

В ходе моделирования при варьировании заданной скорости и момента на валу двигателя был проведен анализ КПД двигателя для различных алгоритмов векторного управления. Результаты этого анализа сведены в диаграммы, представленные на рис. 7 – 8. Синие колонки соответствуют традиционному управлению, красные – энергосберегающему управлению, оранжевые – управлению МТРА.

Анализируя приведенные диаграммы, можно сделать следующие выводы. Очевидно, что энергосберегающее управление в энергетическом плане действительно является более предпочтительным, так обеспечивает максимальный КПД при заданной скорости двигателя. В случае вариации нагрузки КПД при стратегии МТРА также остается постоянным, но его величина существенно меньше, поскольку не учитываются потери в стали двигателя. Стратегия МТРА имеет преимущества по сравнению с традиционным управлением в режимах малых скоростей и нагрузок.

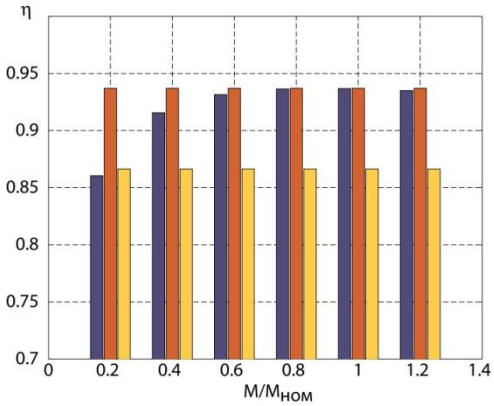


Рис.7. КПД АД при различных алгоритмах векторного управления (вариация момента нагрузки при номинальной скорости)

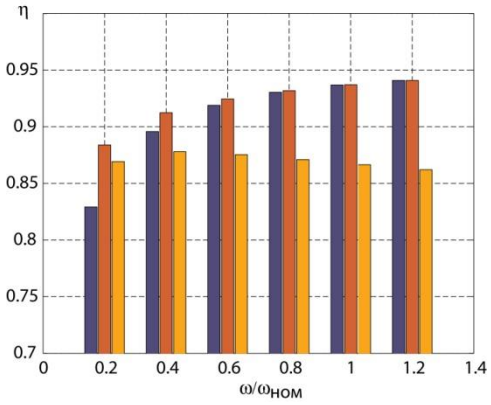


Рис.8. КПД АД при различных алгоритмах векторного управления (вариация заданной скорости при номинальном моменте нагрузки)

Заключение

Оценивая результаты проведенного компьютерного моделирования, можно сделать вывод, что все предложенные алгоритмы векторного управления АД, обеспечивают асимптотическую устойчивость замкнутой системы во всей допустимой области пространства состояний и, следовательно, расширяют область надежной работы систем ПОУ АД в различных режимах движения электромобиля. Использование же алгоритмов энергосберегающего управления позволяют существенно повысить энергетическую эффективность силовой установки электромобиля и увеличить запас хода на одной зарядке аккумуляторных батарей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. T. Chau Electric vehicle machine and drives: design, analysis and application, 2015, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. Учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
3. F. Blaschke. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines: Siemens Rev., vol. 34, no. 1, pp. 217–220, 1972.
4. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Санлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1979.
5. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Современная прикладная теория управления. Ч. III. Новые классы регуляторов технических систем /Под редакцией А.А. Колесникова. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
7. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. и др. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. – Изд. стереотип. URSS, 2019.
8. Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетическое управление нелинейными электроприводами. III. Векторное управление асинхронными электроприводами // Известия вузов «Электромеханика», 2006, № 2, с. 25-36.
9. Веселов Г.Е., Попов А.Н., Радионов И.А. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 166-180.
10. Kwang Hee Nam. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press. 2019.
11. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: Практ. Пособие/Под ред. В. А. Веникова. Кн. 2. Энергосбережение в электроприводе/ Ильинский Н.Ф., Рожанковский Ю.В., Горнов А.О. М.: Высш. Школа, 1989.
12. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. Инварианты электромеханических систем и вибромеханики // Синергетика и проблемы теории управления: Сб. науч. тр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – С. 251 – 269.
13. Попов А.Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.
14. Wasynczuk O. A maximum torque per ampere control strategy for Induction Motor Drives / O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, K. A. Corzine [et al.] // IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. – 1998. – Vol. 13. – P. 163-169.
15. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
16. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – Изд. стереотип. URSS, 2019.
17. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. , 2001.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-51-61

Кузьменко Андрей Александрович

Южный федеральный университет

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ И СКОЛЬЗЯЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ[1]

Аннотация: *Работа иллюстрирует сравнение двух подходов к построению робастных законов управления нелинейными системами: метода синтеза законов скользящего управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий и принципа интегральной адаптации синергетической теории управления. Для компенсации возмущений данные подходы не требуют синтеза наблюдателей возмущений и, соответственно, их оперативной оценки. При наличии общих характеристик результаты сравнения говорят о преимуществе принципа интегральной адаптации.*

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

Abstract: *The work illustrates the comparison of two approaches to the robust control laws design of nonlinear systems: the method of synthesis of sliding mode control basing on sequential aggregate of invariant manifolds and the principle of integrated adaptation of synergetic control theory. These approaches for disturbance compensation do not require to design of disturbance observers and consequently exclude a real-time estimation of these disturbances. There are some common characteristics in these two approaches, but the results of the comparison show the advantage of the principle of integral adaptation.*

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

Введение

Характерной чертой нелинейных динамических объектов является их структурная и параметрическая неопределенность. Наиболее распространенными методами преодоления таких неопределенностей являются методы адаптивного и робастного управления [1]. Из этих методов наилучшую практическую эффективность в обеспечении робастности показали методы синтеза систем со скользящим управлением (sliding mode control – SMC), в которых за счет организации скользящего режима движения изображающей точки (ИТ) объекта можно обеспечить малую чувствительность к изменению параметров объекта (т.н. робастную систему) без их оценки. Эта теория развита в работах С.В. Емельянова [2], В.И. Уткина [3] и их учеников. В современной научной литературе по управлению этим методам посвящено значительное количество фундаментальных и прикладных работ. Развитие теории SMC привело к созданию и широкому использованию скользящих режимов высокого порядка, интегральных скользящих режимов [3], робастных наблюдателей со скользящим режимом [3, 4], нечетких и нейросетевых систем управления со скользящим режимом [5, 6]. Очевидный недостаток SMC состоит в том, что сигналы управления являются разрывными и имеют форму, подобную двуполярному меандру с высокой частотой переключения полярности [7]. Также отмечается, что двуполярный сигнал

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-08-00366.

приводит к повышению энергопотребления в системе [7]. Преодолеть указанные недостатки пытаются за счет адаптации по параметрам поверхности скольжения, например, методами теории адаптивного и интеллектуального управления. Необходимо отметить, что при синтезе SMC по-прежнему остаются актуальными трудности векторного синтеза и анализа устойчивости замкнутой системы и др. [2, 3]. Эти трудности и сложности синтеза SMC позволяет преодолеть синергетическая теория управления (СТУ) [8, 9], в рамках который проф. А.А. Колесниковым для построения робастных законов управления нелинейными системами предложены два подхода: метод синтеза закона скользящего управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий СТУ и принцип интегральной адаптации (ПИА). В данной работе рассмотрено сравнение этих подходов на конкретных нелинейных системах.

1. Методы синтеза законов робастного управления СТУ

Метод синтеза скользящего управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий. Когда не представляется возможным сразу явно задать многообразие с поверхностью скольжения для синтеза нелинейных SMC в СТУ, может использоваться последовательная или параллельная совокупности инвариантных многообразий в фазовом пространстве систем, основанная на развитом в СТУ скалярном и векторном синтезе [8, 9]. Рассмотрим описание метода синтеза скользящего управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий [8]. Пусть исходные дифференциальные уравнения объекта управления имеют вид

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

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

Для системы (1) ставится задача синтеза SMC: требуется определить такое управление $u(\mathbf{x})$ в функции переменных состояния объекта (1), которое обеспечивает перевод ИТ объекта из произвольного исходного состояния (в некоторой допустимой области) в заданное состояние, определяемое желаемым инвариантом – целью управления.

На первом этапе синтеза будем рассматривать многообразие

$$\psi_1 = \sum_{k=1}^{n-1} \beta_k \left|x_k\right| + \left|s_1\right| = 0 \tag{2}$$

где s_1 – это подмногообразие вида

$$s_1 = x_n + u_2(x_1,...,x_{n-1}) = 0, \tag{3}$$

в котором $u_2(x_1,...,x_{n-1})$ – неизвестная на данном этапе непрерывная функция, играющая роль «внутреннего» управления для декомпозированной системы следующего этапа:

$$\begin{aligned} \dot{x}_j(t) &= f_j(x_1,...,x_j) + a_{j+1}x_{j+1}, \;\; j=\overline{1,n-2}; \\ \dot{x}_{n-1}(t) &= f_{n-1}(x_1,...,x_{n-1}) - a_n u_2(x_1,...,x_{n-1}). \end{aligned} \tag{4}$$

На основе основного функционального уравнения СТУ [8, 9]

$$T_1\dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0, \tag{5}$$

в силу исходных уравнений объекта (1), многообразий (2) и (3) находится искомое управление

$$u = -\left(\sum_{k=1}^{n-1} \beta_k \left(f_k\left(x_1,...,x_n\right) + a_{k+1}x_{k+1} \right) \text{sign } x_k - \frac{1}{T_1}\psi_1 \right) \text{sign } s_1 - \\ - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial u_2}{\partial x_k} \left(f_k\left(x_1,...,x_n\right) + a_{k+1}x_{k+1} \right) - f_n\left(x_1,...,x_n\right). \quad (6)$$

Это управление переводит ИТ из произвольного начального состояния на многообразие $\psi_1 = 0$ (2). В связи с тем, что решение $\psi_1 = 0$ уравнения (5) асимптотически устойчиво при $T_1 > 0$, то это означает, что ИТ неизбежно попадает на подмногообразие (3), т. е. на поверхность скольжения. Устойчивое движение вдоль $s_1 = 0$ можно организовать, используя подмногообразия $s_2 = 0,...,s_m = 0$:

$$s_2 = x_{n-1} + u_3\left(x_1,...,x_{n-2}\right) = 0; \\ ... \quad (7) \\ s_m = x_2 + u_{m+1}\left(x_1\right) = 0$$

и синтезируя промежуточные управления $u_2,...,u_{m+1}$ на основе функциональных уравнений вида

$$T_i \dot{s}_i\left(t\right) + s_i = 0, \quad i = \overline{2,m}; \; T_i > 0 \quad (8)$$

и соответствующей декомпозированной системы вида (4).

Управление u_k переводит ИТ на подмногообразие $s_k = 0$ из (7), движение вдоль которого описывается своей декомпозированной системой, размерность которой на единицу меньше размерности предыдущей.

Очевидно, что исходное управление (6) имеет переменную структуру, а «внутренние» (промежуточные) управления $u_2,...,u_{m+1}$ будут представлять собой некоторые непрерывные функции переменных состояния соответствующей декомпозированной системы. Процедура синтеза закона управления (6) завершается после синтеза или выбора последнего «внутреннего» управления, обеспечивающего выполнение желаемого целевого инварианта. Выражение для $u_{m+1}\left(x_1\right)$ выбирается или находится методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) СТУ либо другим методом теории управления. Затем полученное выражение $u_{m+1}\left(x_1\right)$ подставляется в предыдущее управление $u_m\left(x_1, x_2\right)$, которое, в свою очередь, подставляется в $u_{m-1}\left(x_1, x_2, x_3\right)$ и т. д., вплоть до управления $u_2\left(x_1,...,x_{n-1}\right)$, непосредственно входящего в закон управления (6).

Отметим, что согласно методу АКАР [8, 9] условия устойчивости замкнутой системы складываются из условий устойчивости всех использованных функциональных уравнений (5), (8) и условий устойчивости финишной декомпозированной системы, размерность которой существенно меньше размерности исходной системы.

Описанный выше метода синтеза скользящего управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий справедлив и для синтеза векторного управления: в этом случае на первом этапе синтеза вводятся многообразия вида (2), количество которых соответствует числу каналов управления, а последующие этапы идентичны этапам, описанным выше. При этом размерность декомпозированной системы уменьшается на число, соответствующее количеству введённых инвариантных многообразий на каждом этапе синтеза.

Принцип интегральной адаптации. Согласно идеологии ПИА [9-13] для парирования внешних и параметрических возмущений необходимо каждое из них представить в виде динамической модели, на выходе которой формируется аппроксимированное возмущение соответствующего класса. При этом в структуру этих моделей, согласно ПИА, должны входить

финишные макропеременные, включающие желаемые инварианты. Так, если рассматриваются кусочно-постоянные возмущения, то такими моделями будут уравнения вида

$$\dot{z}_i(t) = \Phi_i, \tag{9}$$

где z_i – динамическая переменная модели (оценка) возмущения, Φ_i – функция переменных состояния исходного объекта, отражающая желаемый инвариант.

Таким образом, для использования ПИА для синтеза робастных законов управления необходимо [9-13]:

1) каждое из возмущений представить его моделью вида (9). Соответствующие модели возмущений добавляются к уравнениям объекта управления, образуя расширенную систему. В уравнении объекта каждое возмущение заменяется выходной переменной его модели;

2) для расширенной системы осуществляется синтез законов управления в соответствии с базовой процедурой метода АКАР. Отметим, что в отличие от базовой процедуры метода АКАР при синтезе законов управления в соответствии с ПИА финишные макропеременные всегда должны иметь структуру

$$\psi_i = \Phi_i + \sum_{j=1}^{k} \beta_j z_j, \tag{10}$$

здесь β_j – постоянные коэффициенты; k – количество переменных состояния в модели соответствующего возмущения.

2. Синтез законов робастного управления синхронным генератором

Рассмотрим синтез SMC энергосистемой с одним синхронным генератором (СГ), работающим на шины большой (бесконечной) мощности на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий, обеспечивающего стабилизацию частоты вращения СГ $\omega = \omega_0$ и робастность к параметрическому возмущению. Математическая модель объекта управления, представленная в [14], имеет вид

$$\begin{aligned} &\dot{\delta}(t) = \omega - \omega_0; \\ &\dot{\omega}(t) = a_0 - a_1 E_q' \sin\delta - a_2(\omega - \omega_0); \\ &\dot{E}_q'(t) = -a_3 E_q' - a_4 \cos\delta + a_3 E_f, \end{aligned} \tag{11}$$

здесь δ – синхронный угол СГ; ω – частота вращения ротора СГ; ω_0 – синхронная частота СГ; E_q' – переходная ЭДС СГ по оси q; E_f – напряжение возбуждения СГ (сигнал управления); $a_i, i = \overline{0,4}$ – постоянные коэффициенты.

На первом этапе синтеза задаем инвариантное многообразие вида (2):

$$\psi_1 = \beta_1 |\delta - \delta_0| + \beta_2 |\omega - \omega_0| + |s_1| = 0, \tag{12}$$

где $s_1 = a_1 E_q' \sin\delta + u_2(\delta, \omega)$.

Подставляя (12) в функциональное уравнение (5), получаем в силу уравнений объекта (11), закон управления:

$$\begin{aligned} E_f = &-\frac{1}{a_1 a_3 \sin\delta}\left(\begin{array}{l} \beta_1(\omega - \omega_0)\operatorname{sign}(\delta - \delta_0) + \frac{1}{T_1}\psi_1 + \\ +\beta_2\left(a_0 - a_1 E_q' \sin\delta - a_2(\omega - \omega_0)\right)\operatorname{sign}(\omega - \omega_0) \end{array}\right)\operatorname{sign} s_1 + \\ &+ E_q' + \frac{a_4}{a_3}\cos\delta - \frac{1}{a_1 a_3 \sin\delta}\left(\begin{array}{l} a_1 E_q'(\omega - \omega_0)\cos\delta + \frac{\partial u_2}{\partial\delta}(\omega - \omega_0) + \\ +\frac{\partial u_2}{\partial\omega}\left(a_0 - a_1 E_q' \sin\delta - a_2(\omega - \omega_0)\right) \end{array}\right). \end{aligned} \tag{13}$$

Под действием закона управления (13) ИТ системы (11) попадает в окрестность многообразия (12), движением вдоль которого описывается декомпозированной системой:

$$\begin{aligned}&\dot{\delta}(t)=\omega-\omega_0;\\&\dot{\omega}(t)=a_0+u_2-a_2(\omega-\omega_0).\end{aligned}\qquad(14)$$

Выберем для системы (14) промежуточное управление, например, вида .

$$u_2=-(a_2+\lambda_2)(\omega-\omega_0)-\lambda_1\delta\,.\qquad(15)$$

Тогда уравнение движения ИТ системы (14) с учетом (15):

$$\ddot{\delta}(t)+\lambda_2\dot{\delta}(t)+\lambda_1\delta(t)=a_0.$$

Условие асимптотической устойчивости в целом этого уравнения имеет весьма простой вид: $\lambda_1>0,\lambda_2>0$, а выбором значений этих параметров можно обеспечить желаемый вид переходного процесса по углу СГ.

Проверим выполнения условия возникновения скользящего режима [3]:

$$s_1\cdot\dot{s}_1(t)<0\,.\qquad(16)$$

Имеем поверхность скольжения $s_1=a_1E'_q\sin\delta+u_2(\delta,\omega)$, а ее производную $\dot{s}_1(t)$ выразим из функционального уравнения (5), записанного с учетом (12) и (11):

$$\dot{s}_1(t)=-\Big(\beta_1(\omega-\omega_0)\operatorname{sign}(\delta-\delta_0)+\beta_2\big(a_0-a_1E'_q\sin\delta-a_2(\omega-\omega_0)\big)\operatorname{sign}(\omega-\omega_0)\Big)\times$$

$$\times\operatorname{sign}s_1-\frac{1}{T_1}\psi_1\operatorname{sign}s_1.$$

Тогда условие возникновения скользящего режима (16) обеспечивается выбором параметров $\lambda_i,\beta_i\ 0,T_1>0$.

Рассмотрим теперь синтез робастного закона управления возбуждением СГ (11) в соответствии с ПИА. В качестве параметрического возмущения будем рассматривать механическую мощность СГ P_m, входящую в состав параметра a_0. В правую часть уравнений системы (11), где присутствует этот изменяющийся параметр, аддитивно добавляем динамическую переменную модели кусочно-постоянного возмущения z. В итоге имеем, расширенную систему:

$$\begin{aligned}&\dot{\delta}(t)=\omega-\omega_0;\\&\dot{\omega}(t)=a_0-a_1E'_q\sin\delta-a_2(\omega-\omega_0)+z;\\&\dot{E}'_q(t)=-a_3E'_q-a_4\cos\delta+a_3E_f;\\&\dot{z}(t)=\omega-\omega_0.\end{aligned}\qquad(17)$$

Тогда постановка задачи синтеза закона управления возбуждением СГ (17) в соответствии с ПИА заключается в следующем: необходимо синтезировать робастный нелинейный закона управления возбуждением E_f, который обеспечивает стабилизацию частоты вращения СГ $\omega=\omega_0$ и робастность к параметрическому возмущению. Для этого зададим следующую макропеременную (с учетом (10)):

$$\psi_2=\omega-\omega_0+\gamma z.\qquad(18)$$

Вводим функциональное уравнение второго порядка [15]:

$$\ddot{\psi}_2(t)+\lambda_1\dot{\psi}_2(t)+\lambda_2\psi_2=0,$$

которое записываем с учетом (18) и (17). Полученное алгебраическое уравнение необходимо разрешить относительно неизвестного управления E_f:

$$E_f = E'_q + a_4 a_3^{-1}\cos\delta + \\ + \frac{1}{a_3 a_1 \sin\delta}\begin{pmatrix} -a_1 E'_q(\omega-\omega_0)\cos\delta + (\gamma - a_2)\left(a_0 - a_1 E'_q \sin\delta - a_2(\omega-\omega_0) + z\right) + \\ \lambda_1\left(a_0 - a_1 E'_q \sin\delta - a_2(\omega-\omega_0) + z + \gamma(\omega-\omega_0)\right) + \lambda_1\left((\omega-\omega_0) + \gamma z\right) \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Выполним моделирование замкнутых систем: системы (11) с синтезированным законом управления (13) и законом управления (19). Параметры СГ [14]: $H = 3{,}5;\ T_{d0} = 8;\ x_d = 2{,}1;\ x'_d = 0{,}4$; $x_T = 0{,}016;\ x_{L0} = 0{,}054;\ V_S = 1; D_d = 4;\ P_m = 0{,}9;\ \omega_0 = 1;\ a_0 = \omega_0 P_m/(2H);\ a_2 = D_d/(2H);\ a_3 = 1/T_{d0};$ $a_4 = (x_d - x'_d)V_S/(T_{d0}(x_{L0} + x'_d + x_T));\ a_1 = \omega_0 V_S/(2H(x_{L0} + x'_d + x_T))$; параметры закона управления (13): $\beta_1 = 10; \beta_2 = 20;\ T_1 = 1,\ \lambda_1 = 100; \lambda_2 = 20;$ параметры закона управления (19): $\gamma = 2,\ \lambda_1 = 8; \lambda_2 = 16$. При моделировании рассмотрим изменение механической мощности СГ относительно номинального значения $P_m = 0{,}9$:

$$P_m = \begin{cases} 0{,}9, & t < 2; \\ 1{,}1, & t \ge 2. \end{cases} \quad (20)$$

Результаты моделирования СГ с законами управления (13), (19) и возмущением (20) представлены на рис. 1, 2. Здесь результаты моделирования с законом (13) показаны сплошной линией, а с законом (19) – пунктирной.

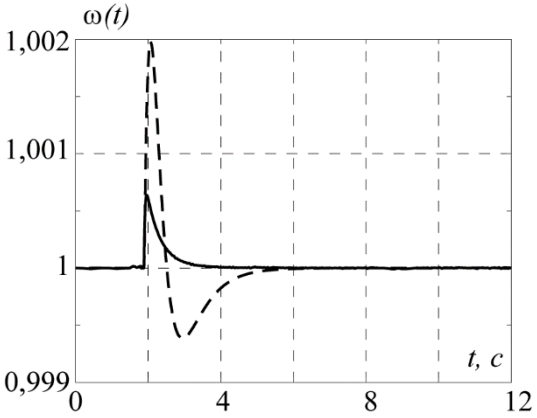


Рис. 1 Графики изменения частоты вращения

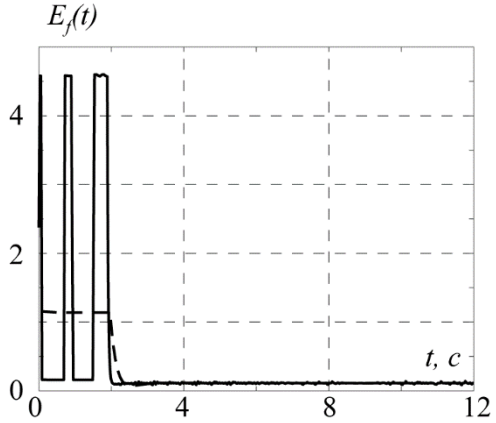


Рис. 2 Графики изменения управлений

Как видим, при параметрическом возмущении (20) целевой инвариант выполняется (показано на рис. 1), что говорит о робастности полученных законов управления к возмущению (20). При сравнении графиков изменения сигналов управления (13), (19) из рис. 2 наглядно видно, что закон управления (13) является непрерывным в отличие от закона (19), в котором осуществляется высокочастотное изменение амплитуды сигнала с переключением полярности.

3. Синтез законов робастного управления хаотической системой

В настоящее время исследование хаотических систем, как в теоретическом (задачи анализа), так и практическом аспектах (задачи синтеза), это довольно интенсивно развивающаяся область современное науки. Хаотические системы находят широкое применение как в инженерии для проектирования генераторов колебаний, лазеров, криптосистем, защищенной передачи данных, построения нейронных сетей и робототехнических систем, так и в биологии, химии, экологии, медицине, экономике и др. [16-18].

Одной из таких инженерных задач управления хаотическими системами является задача синхронизации, в которой необходимо обеспечить синхронное поведение двух взаимосвязанных хаотических систем с одинаковыми или разными хаотическими аттракторами [16-18]: на основе поведения ведущей системы (master system) необходимо так управлять поведением ведомой

системы (slave system), чтобы обеспечить их синхронизацию и робастность к действию параметрических возмущений.

Рассмотрим применение методики синтеза SMC на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий для решения задачи обеспечения робастности при синхронизации двух хаотических систем с аттрактором Спротта (Sprott's jerk system). Математическая модель объекта управления с двумя системами Спротта согласно [17] представлена:

– моделью ведущей системы

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2; \quad \dot{x}_2(t) = x_3; \\ \dot{x}_3(t) &= -ax_1 + x_2^2 - bx_3, \end{aligned} \tag{21}$$

здесь x_i – переменные состояния ведущей системы; $a > 0, b > 0$ – постоянные параметры;

– моделью ведомой системы

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(t) &= y_2; \quad \dot{y}_2(t) = y_3; \\ \dot{y}_3(t) &= -ay_1 + y_2^2 - by_3 + u, \end{aligned} \tag{22}$$

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

Вводя новые переменные – ошибки синхронизации $e_i(t) = y_i(t) - x_i(t)$, $i = \overline{1,3}$, совместную динамику ведущей (21) и ведомой (22) систем согласно [17] представим системой:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= e_2; \quad \dot{e}_2(t) = e_3; \\ \dot{e}_3(t) &= -ae_1 + y_2^2 - x_2^2 - be_3 + u. \end{aligned} \tag{23}$$

Для системы (23) ставится задача построения разрывного закона управления, обеспечивающего синхронизацию ведущей и ведомой систем и робастность к параметрическим возмущениям, воздействующим на ведущую систему.

На первом этапе синтеза задаем инвариантное многообразие вида (2):

$$\psi_3 = \beta_1 |e_1| + \beta_2 |e_2| + |s_1| = 0, \tag{24}$$

где $s_1 = e_3 + u_2(e_1, e_2)$.

Подставляя соотношение (24) в функциональное уравнение (5), получаем в силу уравнений объекта (23), закон управления:

$$\begin{aligned} u = -\left(\beta_1 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \beta_2 e_3 \operatorname{sign} e_2 - \psi_3 / T_3\right) \operatorname{sign} s_1 + ae_1 - y_2^2 + x_2^2 + be_3 - \\ - \frac{\partial u_2}{\partial e_1} e_2 - \frac{\partial u_2}{\partial e_2} e_3. \end{aligned} \tag{25}$$

Под действием закона управления (25) ИТ системы (23) попадает в окрестность многообразия (24), движение вдоль которого описывается декомпозированной системой:

$$\dot{e}_1(t) = e_2; \quad \dot{e}_2(t) = -u_2(e_1, e_2). \tag{26}$$

Выберем для системы (26) промежуточное управление, например, вида

$$u_2(e_1, e_2) = \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2. \tag{27}$$

Тогда движение ИТ системы (26) будет описываться уравнением:

$$\ddot{e}_1(t) + \lambda_2 \dot{e}_1(t) + \lambda_1 e_1 = 0.$$

Условие асимптотической устойчивости в целом этого уравнения имеет весьма простой вид: $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$, а выбором значений этих параметров можно обеспечить желаемый вид переходного процесса. Условие возникновения скользящего режима (16) в этом случае

$$-\left(e_3 + \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2\right)\left(\beta_1 e_2 \operatorname{sign} e_1 + \beta_2 e_3 \operatorname{sign} e_2 + \psi_3 / T_3\right) \operatorname{sign} s_1 < 0$$

обеспечивается выбором параметров $\lambda_i, \beta_i, T_3 > 0$.Таким образом, подставляя (27) в (25), получим итоговое выражение для управления.

Рассмотрим синтез робастного закона управления с использованием ПИА высокого порядка [10]. Допустим, что ведущая система (21) подвержена параметрическим возмущениям: параметры a, b изменяются во времени. Тогда влияние этих возмущений представим динамической моделью в виде последовательно включённых трёх интеграторов:

$$\begin{aligned} &\dot{z}_1(t) = z_2; \quad \dot{z}_2(t) = z_3; \\ &\dot{z}_3(t) = \beta_1 e_1 + \beta_2 e_2 + e_3, \end{aligned} \tag{28}$$

где z_1 – выходная переменная состояния системы (28), которая является динамической оценкой возмущений для системы (21), β_1, β_2 – постоянные коэффициенты.

Объединяя (21), (22), (28), получим расширенную систему:

$$\begin{aligned} &\dot{y}_1(t) = y_2; \quad \dot{y}_2(t) = y_3; \\ &\dot{y}_3(t) = -ay_1 + y_2^2 - by_3 + u; \\ &\dot{x}_1(t) = x_2; \quad \dot{x}_2(t) = x_3; \\ &\dot{x}_3(t) = -ax_1 + x_2^2 - bx_3 + z_1; \\ &\dot{z}_1(t) = z_2; \quad \dot{z}_2(t) = z_3; \\ &\dot{z}_3(t) = \beta_1 e_1 + \beta_2 e_2 + e_3 \end{aligned}$$

или в новых переменных $e_i(t) = y_i(t) - x_i(t)$, $i = \overline{1,3}$:

$$\begin{aligned} &\dot{e}_1(t) = e_2; \quad \dot{e}_2(t) = e_3; \\ &\dot{e}_3(t) = -ae_1 + y_2^2 - x_2^2 - be_3 - z_1 + u; \\ &\dot{z}_1(t) = z_2; \quad \dot{z}_2(t) = z_3; \\ &\dot{z}_3(t) = \beta_1 e_1 + \beta_2 e_2 + e_3. \end{aligned} \tag{29}$$

Таким образом, модель (29) далее используется для синтеза робастного закона управления u. В соответствии с ПИА введём следующую макропеременную (с учетом (10)):

$$\psi_4 = \beta_1 e_1 + \beta_2 e_2 + e_3 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 + \gamma_3 z_3, \tag{30}$$

здесь γ_i – постоянные коэффициенты.

Подставляя ψ_4 (30) в основное функциональное уравнение СТУ вида (5) и решая его совместно с (29) и (30), находим закон управления:

$$u = ae_1 - y_2^2 + x_2^2 + be_3 + z_1 - \beta_1 e_2 - \beta_2 e_3 - \gamma_1 z_2 - \gamma_2 z_3 - \gamma_3(\beta_1 e_1 + \beta_2 e_2 + e_3) - \frac{\psi_4}{T_4}. \tag{31}$$

На многообразии $\psi_4 = 0$ динамика системы (29) описывается следующей линейной декомпозированной системой:

$$\begin{aligned} &\dot{e}_1(t) = e_2; \\ &\dot{e}_2(t) = -\beta_1 e_1 - \beta_2 e_2 - \gamma_1 z_1 - \gamma_2 z_2 - \gamma_3 z_3; \\ &\dot{z}_1(t) = z_2; \quad \dot{z}_2(t) = z_3; \\ &\dot{z}_3(t) = -\gamma_1 z_1 - \gamma_2 z_2 - \gamma_3 z_3. \end{aligned} \tag{32}$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов, обеспечивающих устойчивость системы (32), воспользуемся методом модального управления. Запишем матрицу состояния системы (32) и найдём ее характеристическое уравнение:

$$A(p)=\det\left(p\mathbf{E}-\mathbf{A}\right)=p^5+\left(\beta_2+\gamma_3\right)p^4+\left(\beta_1+\beta_2\gamma_3+\gamma_2\right)p^3+$$
$$+\left(\beta_1\gamma_3+\beta_2\gamma_2+\gamma_1\right)p^2+\left(\beta_1\gamma_2+\beta_2\gamma_1\right)p+\beta_1\gamma_1=0.$$

Зададим желаемое характеристическое уравнение с заданным расположением корней: $A_0(p)=\left(p-p_0\right)^5=p^5-5p_0p^4+10p_0^2p^3-10p_0^3p^2+5p_0^4p-p_0^5=0,$ здесь $p_0<0$ – желаемый корень. Приравнивая коэффициенты этих двух уравнений при одинаковых степенях p, найдём неизвестные коэффициенты:

$$\beta_1=p_0^2,\ \beta_2=-2p_0,\ \gamma_1=-p_0^3,\ \gamma_2=3p_0^2,\ \gamma_3=-3p_0. \qquad (33)$$

Таким образом, выбор коэффициентов $T_4>0$ и вычисление $\beta_i,\ \gamma_j$ согласно (33) обеспечат асимптотическую устойчивость системы (29) с синтезированным законом управления (31).

При моделировании полагаем, что параметры законов управления (25), (31) и ведомой системы (22) неизменны и равны номинальным: $a=1, b=2,02$, а параметры ведущей системы (21) изменяются следующим образом:

$$a=\begin{cases}1, & t<10;\\ 1+0{,}2\sin(20t), & t\geq 10;\end{cases}\qquad b=\begin{cases}2{,}02, & t<10;\\ 2{,}02+0{,}2\sin(20t), & t\geq 10.\end{cases} \qquad (34)$$

На рис. 3-7 сплошной линией показаны результаты моделирования замкнутой системы (21), (22) при возмущениях (34) с синтезированным законом управления (31), параметры которого определяются по (33) при $p_0=-2, T_4=0{,}5$, а пунктирной – с законом скользящего управления (25), параметры которого $T_3=0{,}5; \beta_1=\beta_2=2;\ \lambda_1=\lambda_2=4$.

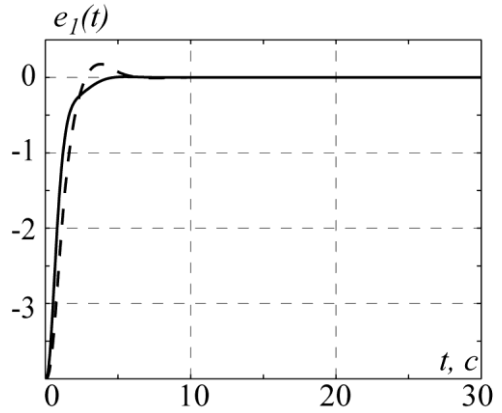


Рис. 3. Графики изменения ошибки $e_1(t)$

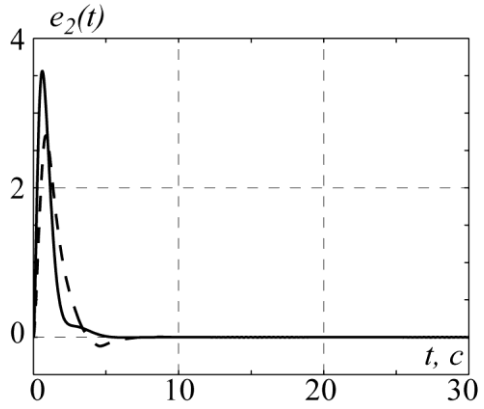


Рис. 4. Графики изменения ошибки $e_2(t)$

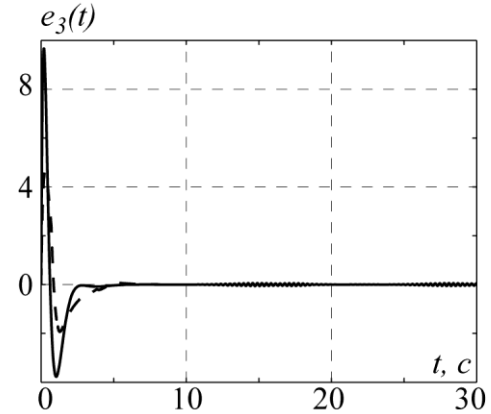


Рис. 5. Графики изменения ошибки $e_3(t)$

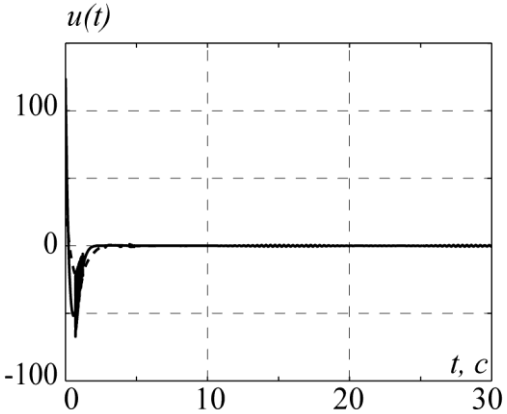


Рис. 6. Графики изменения управлений

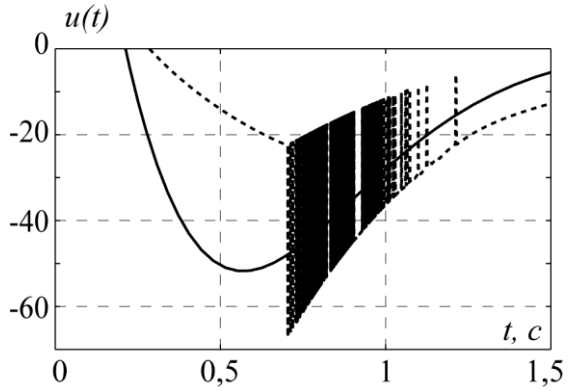


Рис. 7. Графики изменения управлений (начальный этап)

Из рис. 3-5 следует, что законы управления (25), (31) обеспечивают выполнение цели синхронизации при возмущениях (34) с некоторой ошибкой $|e_i(t)| \le 10^{-3}$ и графики изменения ошибок практически идентичны, а графики изменения управлений отличаются только на начальном этапе – возникает высокочастотное переключение сигнала управления (25), что проиллюстрировано на рис. 7. По результатам моделирования необходимо отметить следующее моменты:

– в случае если возмущения (34) носят не гармонический, а кусочно-постоянный характер, то законы управления (25), (31) обеспечивают безошибочное выполнение цели синхронизации;

– большие начальные значения ошибок и управления, которые представлены на рис. 3-6, обусловлены различными начальными условиями ведущей и ведомой систем.

Заключение

Итак, в данной работе представлено сравнение двух подходов к синтезу робастных законов управления нелинейными системами: метода синтеза законов скользящего управления на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий и ПИА СТУ. Указанные подходы изложены в теоретическом аспекте и проиллюстрированы примерами синтеза для нелинейных технических систем.

Общие характеристики этих подходов:

– обеспечивают робастность к параметрическим возмущениям;

– используются как для скалярного, так и векторного синтеза законов управления нелинейными системами;

– для компенсации возмущений не требуют синтеза наблюдателей возмущений и, соответственно, их оперативной оценки.

Следует отметить следующие результаты сравнения этих подходов:

– законы, синтезированные в соответствии с ПИА, структурно проще и не содержат дополнительных функций типа модуля и sign;

– SMC приводят к возникновению высокочастотного изменения амплитуды управления с переключением полярности (chattering), а законы, синтезированные в соответствии с ПИА, не имеют такого негативного эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. – New York: Dover, 2012. – 848 p.

2. Теория систем с переменной структурой / под ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592 с.

3. Utkin V., Guldner J., Shi J. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems. – London: Taylor and Francis, 1999. – 328 p.

4. Ouassaid M., Maaroufi M., Cherkaoui M. Observer-based nonlinear control of power system using sliding mode control strategy // Electric Power System Research. – 2012. – Vol. 84. – P. 135-143.

5. Hung L.-Ch., Chung H.-Y. Decoupled sliding-mode with fuzzy-neural network controller for nonlinear systems// International Journal of Approximate Reasoning. – 2007. – Vol. 46. – P. 74–97.

6. Nekoukar V., Erfanian A. Adaptive fuzzy terminal sliding mode control for a class of MIMO uncertain nonlinear systems // Fuzzy Sets and Systems. – 2011. – Vol. 179. – P. 34-49.

7. Дыда А.А., Маркин В.Е. Системы управления с переменной структурой с парными и нелинейно деформируемыми поверхностями переключения // Проблемы управления. – 2005. – №1. – С. 22-25.

8. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

9. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – 2-е изд. – М.: Либроком, 2012. – 240 с.

10. Кузьменко А.А. Интегральная адаптация высокого порядка в задачах синтеза нелинейных систем управления // Информатика и системы управления. – 2018. – №1(55). – С. 142-153.

11. Кузьменко А.А., Синицын А.С. Использование принципа интегральной адаптации для повышения устойчивости системы возбуждения синхронного генератора // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – №3(49). – С. 8-13.

12. 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.

13. Кузьменко А.А. Нелинейный синтез закона адаптивного управления частотой вращения гидротурбины: интегральная адаптация // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2015. – № 1-2. – С. 85-94.

14. Кузьменко А. А., Попов А. Н., Радионов И. А. Нелинейное робастное управление возбуждением синхронного генератора: синергетическая система с переменной структурой // Информатика и системы управления. – 2014. – №3(41). – С. 130-139.

15. Колесников А.А., Кузьменко А.А., Веселов Г.Е. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 280 с.

16. Boccaletti S., Kurths J., Osipov G., Valladares D.L., Zhou C.S. The synchronization of chaotic systems // Physics Report. – 2002. – Vol. 366, iss. 1-2. – P. 1-101.

17. Vaidyanathan S., Idowu B. A., Azar A. T. Backstepping controller design for the global chaos synchronization of Sprott's jerk systems // Studies in Computational Intelligence. – 2015. – Vol. 581. – P. 39-58.

18. Sprott J.C. Simplest dissipative chaotic flow // Physics Letters. Section A. – 1997. – Vol. 228, iss. 4–5. – P. 271–274.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-62-69

Французова Галина Александровна

Новосибирский государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Аннотация. *Обсуждается задача управления нелинейным динамическим объектом со статической функции качества, которая имеет заранее неизвестное значение экстремума (минимума или максимума). Цель управления заключается в автоматической оптимизации режима работы системы в точке экстремума. Используется идея каскадного управления с организацией разнотемповых процессов. Во внутреннем каскаде применяется регулятор на основе скользящих режимов. Возникающие за счет этого автоколебания предлагается использовать для оценки градиента, аналогичного классическому методу синхронного детектирования. Во внешнем каскаде применяется типовой И-регулятор с информацией о градиенте. Расчет системы и иллюстративный пример представлены в работе.*

Ключевые слова *- экстремум, скользящий режим, разнотемповые процессы, автоколебания, синхронное детектирование.*

Abstract. *The control problem for a special plant as a series connection of the dynamic part and the static quality function with an unknown extremum value (minimum or maximum) is discussed. The control goal is to automatically optimize the system at the extremum point by means of the controller. The main idea of the system design consist of the cascade control with the different processes rates in the each loop. The controller based on the sliding modes is used in the internal cascade for the dynamic part stabilization. The resulting self-oscillations are proposed to use for a gradient estimation similar to the classical synchronous detection method. A typical I-controller with gradient information is added in the external cascade. Some system's properties are illustrated by a simple example presented in the paper.*

Keywords *– extremum, sliding mode, different time-scale processes, self-oscillations, synchronous detection.*

Введение

Решение задач текущей оптимизации работы промышленных систем (настройки на экстремум) предполагает проектирование специальных регуляторов методами теории автоматического управления. В этом случае создают специальные автоматические системы, которые принято называть системами экстремального регулирования (Extremum Seeking Systems в англоязычной литературе). Отличительной особенностью текущей оптимизации является требование определения минимума или максимума показателя качества при недостаточной априорной информации о характере его изменений.

Автоматическая оптимизация с настройкой на экстремум показателя качества применяется в различных технических системах, например, в химических агрегатах, системе максимизации давления в авиационном компрессоре, автономных транспортных средствах [1], а также ряде других устройств [2].

Задача поиска экстремума для динамических объектов методами теории автоматического управления была сформулирована в середине XX в. [3 - 5], причем наиболее перспективным подходом к ее решению является формирование регулятора на основе информация о градиенте экстремальной характеристики [4]. Следует заметить, что в таких системах объект представляет собой последовательное соединение динамической части и статической характеристики с

экстремумом. Классический метод автоматического поиска экстремума (метод ESC) [6] предполагает использование полосовой фильтрации, когда периодический сигнал определенной амплитуды и частоты добавляется к входному сигналу экстремальной характеристики. Для получения оценки градиента применяется фильтр верхних частот, блок умножения и фильтр нижних частот. В качестве регулятора используется интегратор с коэффициентом усиления.

С целью организации движения и стабилизации системы в точке экстремума применяются различные регуляторы. Их выбор зависит, прежде всего, от типа динамической части. Так в случае ее линейного описания можно применять типовые регуляторы. Интересные результаты для объектов с нелинейной динамической частью получены с применением метода ESC [6]. Для стабилизации нелинейных объектов хорошо зарекомендовал себя метод скользящих режимов [7]. Он позволяет обеспечить требуемое качество работы системы и ее робастность при наличии объекта с переменными параметрами. В последнее время предпринимаются попытки применять метод скользящих режимов и для поиска экстремума [8, 9].

Ранее было показано [10 - 12], что для таких объектов целесообразно использовать двухконтурное управление с различными темпами процессов в каждом контуре и рассчитывать регуляторы независимо друг от друга. Скользящий режим организуется во внутреннем контуре, что позволят стабилизировать в нем процессы и обеспечить инвариантность по отношению к параметрам динамической части и внешним возмущениям. Возникающие при этом автоколебания предлагается использовать в качестве поискового сигнала для оценки градиента аналогично методу синхронного детектирования [13, 14]. В данной статье на примере объекта второго порядка представлен синтез регуляторов внутреннего и внешнего контуров управления, а также формирование управляемых автоколебаний.

Постановка задачи

Будем рассматривать одноканальный нелинейный объект управления с динамической частью (ДЧ) второго порядка и статической экстремальной характеристикой (ЭХ), которая в малой окрестности экстремума обычно с достаточной точностью аппроксимируется параболой:

$$\begin{cases} \ddot{y} = f(t,\dot{y},y) + b(t,\dot{y},y)u, \\ Y = q\left(y - y_e\right)^2 + Y_e \end{cases} \qquad (1)$$

где y – выходная переменная динамической части; u - управляющее воздействие; функции $f(t,\dot{y},y)$ и $b(t,\dot{y},y)$ могут быть известны неточно кроме их граничных значений: $f_{\min} \le f(t,\dot{y},y) \le f_{\max}$ и $b_{\min} \le b(t,\dot{y},y) \le b_{\max}$; здесь явная зависимость функций $f(t,\dot{y},y)$ и $b(t,\dot{y},y)$ от времени отражает действие неконтролируемых внешних возмущений на динамическую часть объекта; $Y(y)$ – однозначная экстремальная характеристика.

Необходимо с помощью регулятора организовать автоматический поиск экстремума $(y_e; Y_e)$ с определенным быстродействием t_n^* и относительной статической ошибкой δ^*.

Двухкаскадное управление

Основой двухкаскадного управления является наличие двух различных составляющих объекта: динамической части и статической функции, отражающей общее качество работы системы (рис. 1).

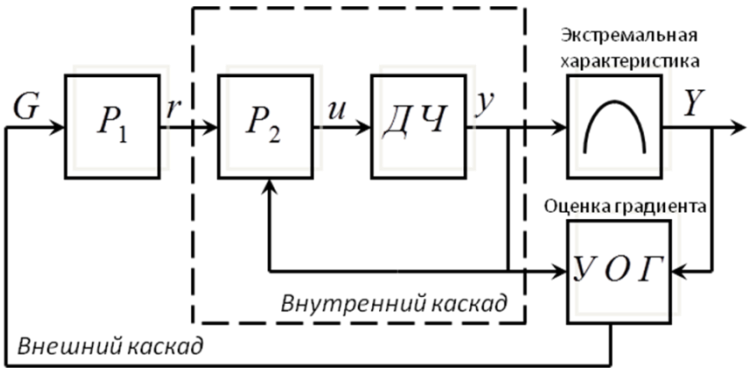


Рис. 1 – Схема двухконтурной системы управления

Предлагается искусственно ускорить процессы во внутреннем контуре [12], чтобы получить две относительно независимые подсистемы управления. Такой прием позволяет регуляторы каждого контура (P_1 и P_2) рассчитывать независимо друг от друга, ориентируясь на заданную длительность процессов и точность достижения экстремума.

Стабилизация процессов во внутреннем контуре

На первом этапе рассчитывается регулятор для стабилизации процессов в динамической части. С этой целью применяется регулятор P_2, сформированный на основе метода скользящих режимов [7] в виде

$$u = u_m sign\, S(y, \dot{y}, r) \qquad (2)$$

где u_m – размах реле; $S(y, \dot{y}, r)$ – функция переключений, которая формируется в виде линейной поверхности

$$S(y, \dot{y}, r) = cr - cy - \dot{y} = 0 \qquad (3)$$

причем коэффициент c выбирается на основе требований к быстродействию процессов во внутреннем контуре.

Как известно, при переходе в режим скольжения процессы внутреннего контура будут соответствовать линейному уравнению поверхности (3), т.е. будут инвариантны по отношению к внешним возмущениям и нестационарным параметрам ДЧ объекта.

Поскольку закон управления (2) содержит производную выходной переменной, то для ее оценки в контур добавляется специальное дифференцирующее устройство [14] с малой постоянной времени μ и коэффициентом демпфирования d вида

$$W_f(s) = \frac{y_1}{y} = \frac{1}{\mu^2 s^2 + 2d\mu s + 1} \qquad (4)$$

где y_1 и $\dot{y}_1$ - оценки выходной переменной динамической части и ее первой производной соответственно. Данное устройство порождает во внутреннем контуре регулирования дополнительные быстрые автоколебательные процессы, которые локализованы в замкнутой подсистеме [11 - 12].

Параметры автоколебаний в контуре быстрых движений на выходе дифференцирующего устройства, $\dot{y}_1 = a_1 \sin \omega_0 t$, определяются в соответствии с методом гармонического баланса в виде

$$\omega_0 = \frac{1}{\mu}; \qquad a_1 = \frac{2u_m b_{\max} \mu}{\pi d} \qquad (5)$$

Видно, что они зависят от коэффициентов дифференцирующего устройства (4) и релейного регулятора (2), т.е. могут задаваться произвольным образом и в этом смысле являются управляемыми автоколебаниями.

Поиск экстремума во внешнем контуре

На втором этапе нужно обеспечить поиск экстремума во внешнем контуре управления на основе информация о градиенте выходной характеристики $G = \partial Y / \partial y$. Поскольку процессы во внутреннем контуре протекают на порядок быстрее, чем требуется организовать поиск экстремумам, то при расчете регулятора P_1 учитывается равновесный режим внутреннего контура, который соответствует условию $y = r$. Для внешнего контура используем типовой интегральный регулятор, который сформируем в функции градиента,

$$r(t) = r(0) - \alpha \int_0^t G(\tau) d\tau \qquad (6)$$

На этапе расчета коэффициента α полагаем, что градиент можно оценить точно из второго соотношения (1) в виде $G = 2q(y - y_e)$. Запишем дифференциальное уравнение регулятора в форме

$$\dot{r} = -2\alpha q(y - y_e)$$

на основе которого с учетом условия равновесия внешнего контура $y = r$ получим дифференциальное уравнение внешнего каскада

$$\dot{y} + 2\alpha q y = 2\alpha q y_e \qquad (7)$$

Отметим, что процессы внешнего каскада управления всегда описываются линейным дифференциальным уравнением (7), а коэффициент регулятора α рассчитывается модальным методом с учетом требуемой длительности процесса выхода на экстремум t_n^*. Как следует из (7), положение равновесия внешнего контура $y = y_e$ является искомой точкой экстремума, т.е. ее поиск осуществляется автоматически.

Для практической организации закона управления (6) требуется получать текущую оценку градиента. Для этой цели используем автоколебания, возникающие во внутреннем контуре $\dot{y}_1$ (рис. 2) с параметрами (5).

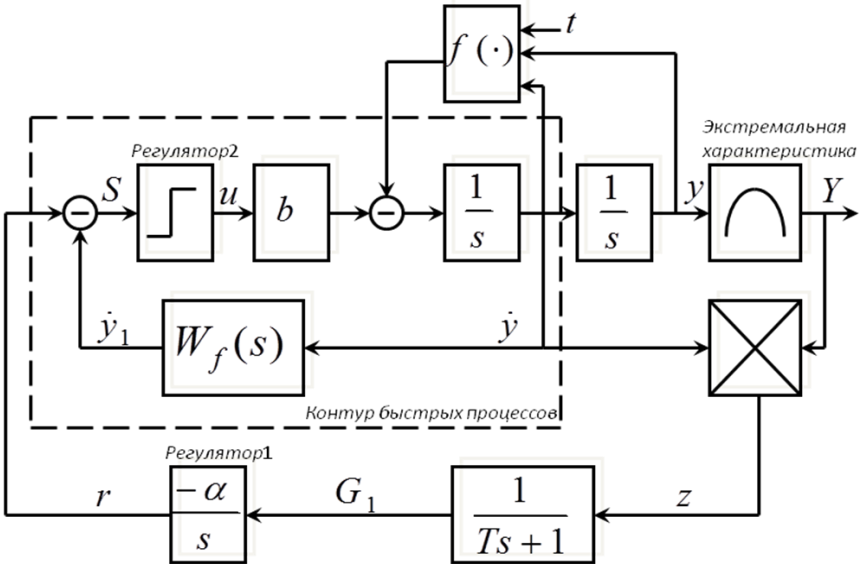


Рис.2 – Схема системы с дифференцирующими устройствами

Определим теперь автоколебания на выходе подсистемы быстрых движений, которые появляются в сигнале $\dot{y}$. Понятно, что частота автоколебаний остается неизменной, а изменяется только их амплитуда. Учитывая амплитудную частотную характеристику

дифференцирующего устройства $A_f(\omega) = \left[(1-\mu^2\omega^2)^2 + 4d^2\mu^2\omega^2\right]^{-1/2}$, определим автоколебания на его входе, $\dot{y} = a_2 \sin\omega_0 t$, где $a_2 = 2da_1$. Для нахождения автоколебаний, поступающих на вход экстремальной характеристики ($y = a_0 \sin\omega_0 t$) учтем амплитудную частотную характеристику интегрирующего звена. В результате получим колебания с частотой ω_0 и амплитудой $a_0 = a_2\mu = 2da_1\mu$, которые и будем использовать в качестве поискового сигнала для оценки градиента аналогично методу синхронного детектирования.

В качестве фазочувствительного устройства используется блок умножения. Сигнал z на его выходе представляет собой произведение $z = Ya_2 \sin\omega_0 t$, а с учетом линейной аппроксимации экстремальной характеристики в малой окрестности рабочей точки [14] равен $z = Y_e a_2 \sin\omega_0 t + Ga_0 a_2 \sin^2\omega_0 t$, где Y_e - точка экстремума; G - точное значение градиента. При этом оценка градиента $G_1 = \pi a_0 a_2 G$ получается на выходе усредняющего фильтра с передаточной функцией $W(s) = \dfrac{1}{Ts+1}$, где T – его постоянная времени. Таким образом окончательно выражение для оценки градиента принимает вид

$$G_1 = \frac{16}{\pi} u^2{}_m b^2{}_{\max} \mu^3 G \qquad (8)$$

Именно эта оценка градиента используется для формирования регулятора (6).

Порядок синтеза системы автоматической оптимизации

Этапы синтеза системы, обеспечивающей автоматический поиск экстремума с заданными свойствами, включают в себя расчеты параметров регуляторов отдельных контуров управления, а затем добавление к ним дополнительных устройств, с помощью которых оцениваются необходимые оценки производных и градиента.

Прежде всего, на основе требуемой ошибки выхода на экстремум δ^* и длительности процесса поиска t_n^* для системы (7) модальным методом определяется коэффициент α регулятора внешнего контура (6) в предположении точной оценки градиента.

Далее формируется поверхность переключений (3) из условия искусственного ускорения процессов во внутреннем контуре по сравнению с внешним.

Для получения адекватной оценки градиента на основе анализа модели ДЧ объекта и его ЭХ в соответствии с рекомендациями метода синхронного детектирования определяются параметры поисковых колебаний a_0 и ω_0, которые будут обеспечивать поиск экстремума Y_e с требуемой точностью.

Затем вычисляются постоянная времени $\mu = 1/\omega_0$ и амплитуда колебаний на выходе контура быстрых движений: $a_1 = a_0/2d\mu$, где коэффициент демпфирования дифференцирующего устройства $d = 0.5...07$.

Наконец, из выражения (5) вычисляется размах реле для регулятора внутреннего контура в виде $u_m = \dfrac{a_1 \pi d}{2b_{\max}\mu}$.

Результаты моделирования

Рассмотрим представленную процедуру синтеза и свойства системы на примере объекта с моделью вида

$$\begin{cases} \ddot{y} + a(t)\dot{y}y = 5u + \varphi(t), \\ Y = Y_e + \gamma(y - y_e)^2 \end{cases}$$

где $a(t)$ изменяется в диапазоне $|a(t)| \le 3$, $\gamma = 0,5$; $\varphi(t)$ - произвольное внешнее возмущение, $|\varphi(t)| \le 10$; $|u| \le 200$. Необходимо автоматически выйти в точку экстремума $\{y_e = 1; Y_e = 1\}$ из начального состояния $y(0) = 2,\ \dot{y}(0) = 0$ за время $t_n \le 5\,c$

Рассчитанные параметры дифференцирующего устройства и регуляторов: $|u_m| = 125$; $\mu_1 = 0,01c$; $\alpha = 0,4$; $c = 8$. Уравнение поверхности переключений имеет вид $S(y, \dot{y}, r) = -8r + 8v - \dot{y} = 0.$ Параметры поисковых колебаний: $a_0 = 0,08$; $\omega_0 = 100\,{}^{рад}/_{с}$.

На рис. 3 и 4 представленя процессы движения к экстремуму на выходе динамической части и системы соответственно при произвольном изменении параметра объекта $a(t)$ в указанном диапазоне. Рис. 5 иллюстрирует движение к экстремуму вдоль статической экстремальной характеристики.

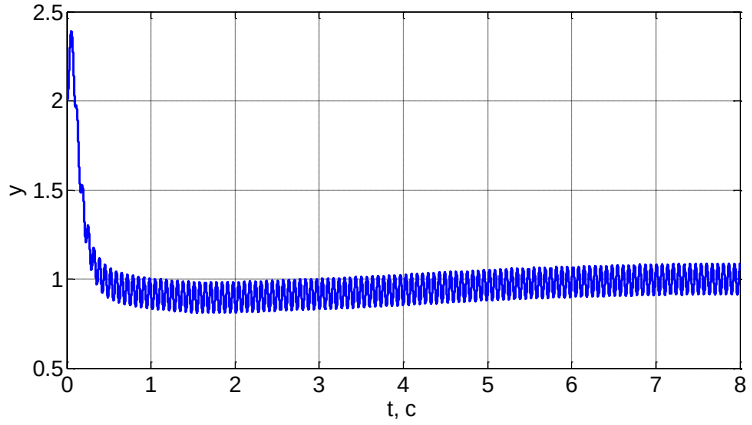


Рис. 3 – Процесс на выходе динамической части системы

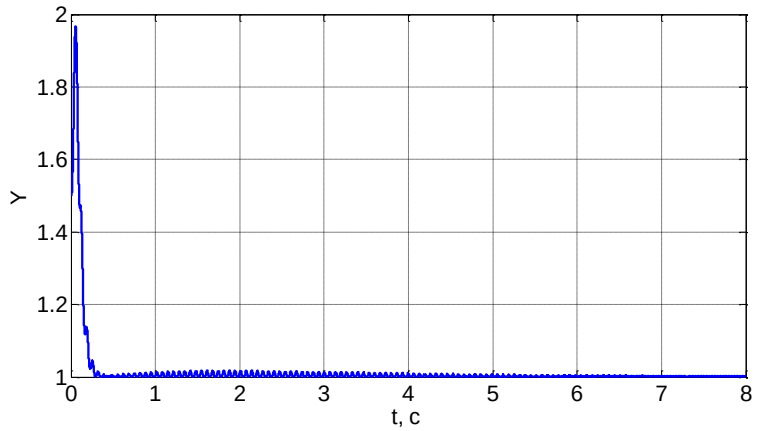


Рис. 4 – Процесс на выходе системы

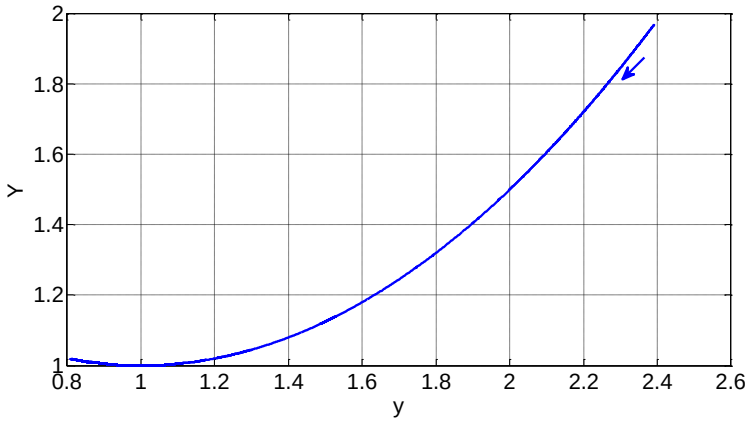


Рис. 5 – Иллюстрация поиска экстремума

По графикам видно, что влияние нестационарного параметра объекта успешно подавляется во внутреннем контуре и не влияет на изменение $Y(t)$ и $y(t)$. Следует отметить, что процессы на выходе динамической части и всей системы не изменяются также и при произвольном возмущающем воздействии $\varphi(t)$. Таким образом, в замкнутой системе успешно осуществляется поиск экстремума в соответствии с заданными требованиями.

Заключение

Представленный в работе подход к синтезу двухкаскадной системы позволяет успешно решать задачу автоматической оптимизации для широкого класса нелинейных объектов управления, функционирующих в условиях действия внешних возмущений. Применение во внутреннем контуре регулятора, основанного на методе скользящих режимов, делает систему инвариантной как по отношению к нестационарным параметрам, так и внешним неконтролируемым возмущениям.

Возникающие во внутреннем каскаде в качестве «побочного» эффекта автоколебания используются в качестве поисковых для оценки градиента экстремальной характеристики аналогично методу синхронного детектирования. Однако в отличии от классической схемы этого метода, в данном случае отсутствует необходимость введения в систему специального генератора поисковых колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cochran J., Krstic M. Nonholonomic source seeking with tuning of angular velocity / IEEE Trans. on Automatic Control. 2009. Vol. 54. № 4. P. 717–731.
2. Tan Y., Moase W., Manzie C., Nesic D., Mareels I. Extremum seeking from 1922 to 2010 / Proc. of 29th IEEE Chinese Contr. Conf. 2010. P. 14–26.
3. Моросанов И.С. Метод экстремального управления / Автоматика и телемеханика. 1957. № 18. С. 1077-1092.
4. Растригин Л.А. Системы экстремального регулирования. М.: Наука. 1974.
5. Blackman P.F. Extremum-seeking regulators. An exposition of adaptive control. NY: The Macmillan Company. 1962.
6. Ariyur K.B., Krstic M. Real-time optimization by extremum-seeking control. New-Jersey: Wiley and Sons. 2003.
7. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука. 1981.
8. Fu L., Ozguner U. Variable structure extremum seeking control based on sliding mode gradient estimation for a class of nonlinear systems / Proc. of Americ. Contr. Conf. 2009. P. 8–13.

9. Peixoto A.J., Oliveira T.R. Extremum seeking control via sliding mode and periodic switching function applied to raman optical amplifiers / Proc. of Americ. Contr. Conf. 2012. P. 5377–5382.

10. Frantsuzova G.A. Use of a relay controller for automatic extremum seeking in nonlinear systems / Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. Vol. 47. № 3. P. 274–280.

11. Suvorov D.A., Frantsuzova G.A. Cascaded extremum seeking system design with sliding modes organization. / 11 Intern. Forum on Strateg. Technol. 2016. Vol.1. P. 590 – 593.

12. Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S., Suvorov D.A. Two-cascade extremum seeking systems for nonlinear non-stationary plants / Intern. Multi-Conf. on Industrial Engin. and Modern Technol. 2018. P. 1334-1338.

13. Atta K.T., Johansson A., Gustafsson T. Extremum seeking control based on phasor estimation / Systems & Control Letters. 2015. Vol.85. P. 37-45.

14. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. М.: Юрайт. 2017.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-70-79

Душин Сергей Евгеньевич, Шпаковская Ирина Игоревна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Аннотация. *Промышленные стоки гальвано- и металлообрабатывающих предприятий характеризуются трудноутилизируемыми веществами. Цель работы – анализ динамической математической модели биосорбционной очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Рассмотрено поведение базовых моделей биологической очистки и сорбции, составляющих основу технологического процесса биосорбции. Произведена модификация математической модели процессов биосорбции. Исследовано влияние концентрации загрязнений на выходе биосорбера в зависимости от концентраций ила, загрязнений и ионов тяжелых металлов на входе. Разработана система управления расходом обратного потока активного ила.*

Ключевые слова: *биосорбция, очистка, моделирования, регулятор, сточные воды, очистка, биосорбционная технология, моделирование процессов, система управления, пропорциональный регулятор.*

Annotation. *Industrial effluents from electroplating and metalworking enterprises are characterized by substances that are difficult to utilize. The purpose is to analyze a dynamic mathematical model of biosorption wastewater treatment from heavy metals. The behavior of the basic models of biological treatment and sorption, which form the basis of the biosorption process, is considered. A modification of the mathematical model of biosorption processes. The influence of the concentration of pollutants at the output of the biosorber was investigated depending on the concentrations of sludge, pollutants and heavy metal ions at the entrance. A system for controlling the flow rate of the activated sludge backflow has been developed.*

Keywords: *biosorption, modeling, regulator, wastewater, purification, biosorption technology, process modeling, control system, proportional regulator.*

Введение

Сегодня во всем мире наблюдается тенденция увеличения количества предприятий и, как следствие, рост водопотребления. В связи с этим возникает вопрос о сохранности и рациональном использовании водных ресурсов. Ряд предприятий, занимающихся металлообработкой, нефтепереработкой, нанесением гальванического покрытия, насыщают стоки опасными веществами (нефтепродукты, ионы тяжелых металлов (ИТМ) и т.д.), наличие которых, в соответствии с предельно допустимыми нормами, должно быть минимально и строго регламентированно. Установлено, что наряду с нефтепродуктами именно тяжелые металлы являются тяжелоутилизируемыми отходами производств. Для решения проблемы очистки стоков можно выделить целый комплекс мер, одна из которых – повышения качества очистки сточных вод за счет моделирования и синтеза регуляторов.

Сравнивая биологические, сорбционные методы очистки сточных вод, можно выделить технологию очистки, которая совмещает в себе преимущества биохимического и адсорбционного способа – биосорбция [1].

Основными преимуществами биосорбционной технологии очистки промышленных сточных вод являются повышение скорости очистки, высокая эффективность удаления из воды веществ, устойчивых к биохимическому окислению в обычных аэротэнках и на биофильтрах, а так же уменьшение влияния «залповых» нагрузок на работу очистных сооружений [2]. Наиболее перспективная технология биосорбционной очистки сточных вод от ИТМ представлена в [2].

Таким образом, целью данной работы является анализ модели технологического процесса биосорбции и разработка системы управления расходом обратного потока активного ила.

Биосорбционная очистка стоков

Как правило, на крупных промышленных предприятиях для очистки вод используют аэротенки – резервуары, через которые пропускается сточная вода с илом, одновременно насыщая жидкость кислородом. За счет аэраторов (пневматических или механических), воздух вводится в резервуар и осуществляется перемешивание обрабатываемой сточной воды с активным илом. Благодаря насыщению сточной воды активным илом и непрерывным поступлением кислорода обеспечивается высокая интенсивность биохимического окисления органических веществ [1]. Однако, некоторые предприятия, такие как гальванообрабатывающие, металлообрабатывающие или нефтеперерабатывающие, имеют специфический состав сточных вод, которые не могут быть очищены биологическим способом.

В середине 90-х годов XX века был разработан новый метод, сперва используемый только для доочистки, а позже − и для полной очистки, заключающийся в совмещении в пространстве и во времени процессов сорбции загрязнений на активном сорбенте с их биологическим окислением. Такой процесс носит название биосорбционной очистки, а аппараты для его реализации – биосорберы [1].

Биосорбция – это процесс, объединяющий во времени и в пространстве биологическое окисление загрязнений микроорганизмами, в том числе фиксированными (иммобилизованными) на сорбенте, и адсорбцию загрязнений на поверхности и в порах сорбента.

Принципиальное отличие биосорбционной технологии от биохимической состоит в том, что рабочая среда имеет три основных компонента – активный ил, другой гранулированный сорбент и сточную воду.

Сорбент в системе с активным илом играет важную роль и выполняет следующие важные функции:

– защищает биоциноз активного ила от негативного действия «залповых» нагрузок, благодаря эффективной адсорбции, при этом обратимо адсорбированные вещества представляют собой доступный субстрат для микроорганизмов;

– является аккумулятором кислород, накапливая его в поровом пространстве и предупреждая, кислородное голодание простейших и микроорганизмов при кратковременных «залповых» увеличениях концентраций загрязнений вод, поступающих на очистку;

– предоставляет свою поверхность для закрепления ила, способствуя увеличению биомассы в зоне очистки и повышению биохимической активности микроорганизмов. То есть создает благоприятную среду для развития биоценоза.

Микроорганизмы же, ведущие процесс обработки, постоянно регенерируют поверхность адсорбента, то есть постоянно протекает процесс *биорегенерации*. *Биорегенерация* – процесс, при котором адсорбированные органические вещества становятся доступными для биоокисления и обновляется поверхность адсорбента.

Эффективность биосорбционного метода очистки, обусловлена следующими процессами, протекающими в биосорбере:

– иммобилизация микроорганизмов на поверхностях адсорбционных материалов;

– адгезионно-сорбционные (за счет сцепления и поглощения) изъятие загрязняющих веществ биопленкой;

– сорбция примесей, в том числе, токсичных компонентов сточных вод на поверхности адсорбента;

– биологическое окисление загрязняющих веществ микроорганизмами, закрепленными на поверхности сорбента.

Технологическая схема биосорбции

Наиболее перспективная технология биосорбционной очистки сточных вод от ИТМ представлена в [2].

Биосорционный процесс организуется в биосорбере горизонтального типа путем периодической загрузки гранулированнного адсорбента в специальные мешалки, состоящие из трех жестко закрепленных сетчатых барабанов, расположенных на некотором расстоянии от оси вращения (рис. 1). При вращении барабанов ил и абсорбент приходят в движение, при этом обеспечиваются хорошие условия массообмена. Микроорганизмы активного ила развиваются на поверхности адсорбента, что повышает эффективность их работы. Так, при «залповых» нагрузках адсорбент в большей степени поглощает загрязнения, сохраняя условия для нормальной жизнедеятельности микроорганизмов.

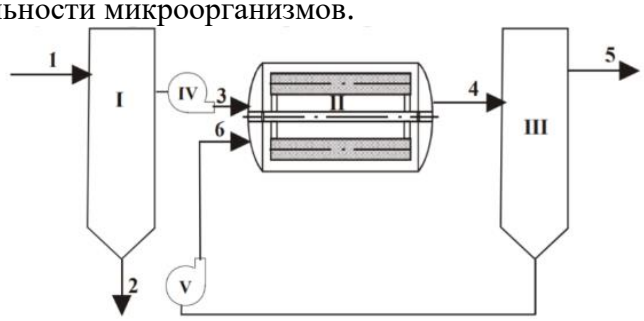


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки:

I – первичный отстойник; II – биосорбер горизонтального типа с перемешивающим устройством барабанного типа; III – вторичный отстойник; с анаэробном илом; IV , V – насосы;

1 – сточная вода, содержащая ИТМ; 2 – механические примеси; 3 – сток без механических примесей; 4 – обработанная жидкость в смеси; 5 – очищенная вода; 6 – рецикл анаэробного ила

Базовые модели биохимической и сорбционной очистки

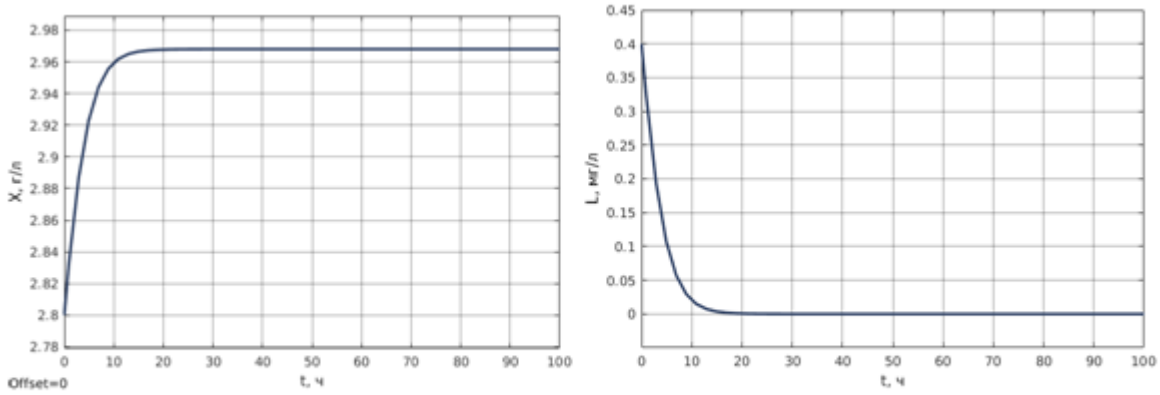
Для последующего компьютерного моделирования процессов, протекающих в биосорбере, был поставлен ряд экспериментов с базовыми моделями биологической очистки и сорбции.

В условиях периодического режима кинетика биореактора хорошо описывается уравнениями типа Моно, которые учитывают лимитирование роста по концентрации субстрата:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_m XL}{(K_L + L)}; \frac{dL}{dt} = -\frac{1}{Y} \cdot \frac{\mu_m XL}{(K_L + L)}, 2$$

где X – концентрация ила; L – концентрация загрязнений; μ_m – максимальная удельная скорость роста; K_L – константа полунасыщения Моно; Y – экономический коэффициент.

Реализация математической модели (ММ) произведена среде Simulink. На рис. 2 представлены графики изменения концентраций ила и загрязнений на временном промежутке от 0 до 100 часов.



а *б*

Рисунок 2 – Графики изменения концентраций биомассы *(а)* и загрязнений *(б)*

Так как в сточных водах рассматриваемых предприятий присутствуют трудно утилизируемые углеводороды, субстрат будет обладать ингибирующим действием на скорость роста. Этот первый фактор можно учесть, приведя ММ к форме уравнений Моно-Халдейна. Второй фактор, который обуславливает замедление скорости роста активного ила, связан с так называемым «эндогенным метаболизмом» и может быть учтен в соответствии с корректировкой уравнения Моно, выполненной Гербертом. Третий фактор, обуславливающий замедление роста микроорганизмов, проявляется в виде ингибирующего действия ИТМ. Для учета этого фактора [3] можно еще модифицировать уравнение Халдейна-Герберта.

Следует учесть тот факт, что одновременно с процессами биоокисления в системе с активным илом протекают процессы сорбции. В некоторых случаях скорость очистки за счет сорбции намного превышает скорость биоокисления. Существуют различные виды сорбции. Например, трансформация субстрата в такой вид соединения, при котором он может служить дополнительным источником питания для микроорганизмов, либо адсорбция поверхностью иловых хлопьев. Таким образов, на хлопьях активного ила образуется резервный субстрат (избыток пищи).

Процесс трансформации субстрата можно описать уравнениями, видоизменив модель Моно:

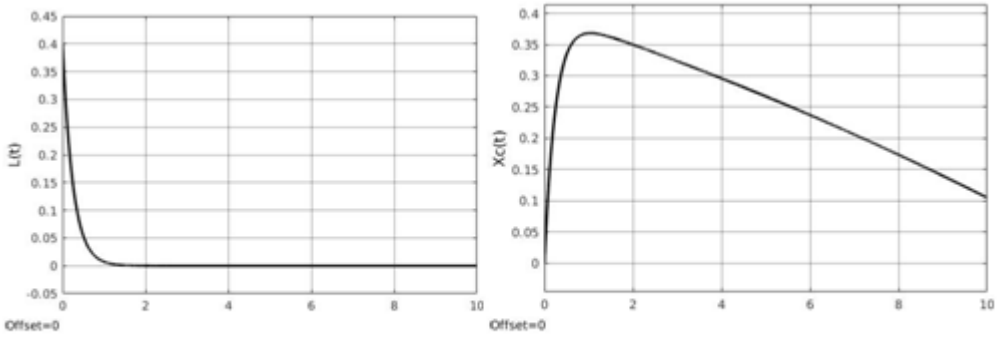
$$\frac{dL}{dt} = -hKL(X_c^* - X_c);$$

$$\frac{dX_c}{dt} = KL(X_c^* - X_c) - \mu_m \frac{X}{Y};$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m X,$$

где L – концентрация загрязнений в растворе; X_c – суммарная концентрация сорбированных веществ; X – концентрация активной биомассы ила; X_c^* – равновесная концентрация сорбированных загрязнений; K– константа скорости сорбции; h – коэффициент перехода от концентрации в г/л к кислородным единицам; μ_m – максимальная удельная скорость роста.

На рис. 3 приведены графики изменения концентраций.



а *б*

Рисунок 3 – Графики изменения концентраций загрязнений *(а)* и сорбированных веществ *(б)*

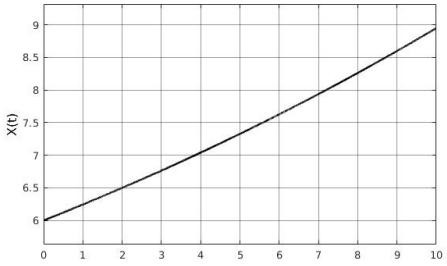


Рисунок 4 – График изменения концентрации активного ила

Из графиков видно, что после того, как «емкость иловых хлопьев» была полностью заполнена (X_c^* - X_c = 0), микроорганизмы начали использовать накопленный ресурс для питания. График на рис. 4 представляет собой зависимость роста концентрации активного ила, что обусловлено непрерывным потреблением активным илом адсорбированных отложений загрязнений на хлопьях.

Так как в ММ не учтено, что физически из «емкости иловых хлопьев» не может быть изъято больше, чем было накоплено содержимого, а так же отмирание биомассы, график концентрации ила бесконечно возрастает, а величина концентрации сорбированных веществ уменьшается до нуля.

Моделирование процессов биосорбции

Для исследования была выбрана ММ биосорбции [2], представленная в форме системы нелинейных дифференциальных уравнений. Сохраняя идейную основу модели [2], она была модифицирована с целью получения устойчивых режимов, как того требует физический смысл процессов.

$$\frac{dX}{dt} = D(X_{\text{вх}} - X) + \frac{\mu_m XL}{(K_L + L + \frac{L^2}{K_i} + \frac{Me^2}{K_{Me}})} - \beta X;$$

$$\frac{dL}{dt} = D(L_{\text{вх}} - L) - K_X(L^*_C - L_C) - K_A(L - L^*_C) + 9\chi;$$

$$\frac{dL_C}{dt} = K_X(L^*_C - L_C) - \frac{1}{Y}\frac{\mu_m XL_C}{(K_L + L_C + \frac{L_C^2}{K_i})};$$

$$\frac{dL_A}{dt} = K_A(L - L^*_C);$$

$$\frac{dMe}{dt} = D(Me_{вх} - Me) - K_{XMe}(Me_C - Me^*_C) - K_{AMe}(Me - Me^*_C) - 9\chi;$$

$$\frac{dMe_C}{dt} = K_{XMe}(Me^*_C - Me_C); \frac{dMe_A}{dt} = K_{AMe}(Me - Me^*_C);$$

$$X_{вх} = \frac{rX_r}{1+r}; L_{вх} = \frac{rL_f}{1+r} + \frac{rL}{1+r}; Me_{вх} = \frac{rMe_f}{1+r} + \frac{rMe}{1+r};$$

$$D = \frac{1}{t_{пр}}; t_{пр} = \frac{V}{\nu(1+r)}, \frac{d\chi}{dt} = k(A_{10} - \chi)(A_{20} - \chi)(A_{30} - \chi);$$

где X – концентрация ила (текущая); X_r – концентрация ила на входе в систему; $X_{вх}$ – концентрация биомассы на входе в аппарат (после рецикла) [2];

L – концентрации загрязнения (текущая); L_f – концентрация загрязнений на входе в систему; $L_{вх}$ – концентрация загрязнений на входе в аппарат;

L_C – концентрация загрязнений, адсорбированных на хлопья ила и биопленку; L_A – концентрация загрязнений, адсорбированных поверхности адсорбента; L^*_C – равновесная концентрация загрязнений в жидкой фазе;

Me – концентрации ИТМ (текущая); Me_f – концентрация ИТМ на входе в систему; $Me_{вх}$ – концентрация ИТМ на входе в аппарат;

Me_C – концентрация ИТМ, адсорбированных на хлопья ила и биопленку; Me_A – концентрация ИТМ, адсорбированных поверхности адсорбента; Me^*_C — равновесная концентрация ИТМ в жидкой фазе;

K_X – коэффициент массопередачи загрязнений к биомассе (хлопьям и биопленке); K_A – коэффициент массопредачи загрязнений к адсорбенту; K_{XMe} – коэффициент массопередачи ИТМ к биомассе (хлопьям и биопленке); K_{AMe} – коэффициент массопредачи ИТМ к адсорбенту;

K_{Me} – константа учитывающая ингибирующее действие ИТМ;

D – скорость вымывания; V – объем аппарата; ν – объемная скорость подачи сточной воды в аппарат; r – коэффициент рециркуляции.

Компьютерная модель системы реализована в среде Simulink (рис.5) и включает в себя 3 подсистемы «Активный Ил», «Загрязния», «ИТМ».

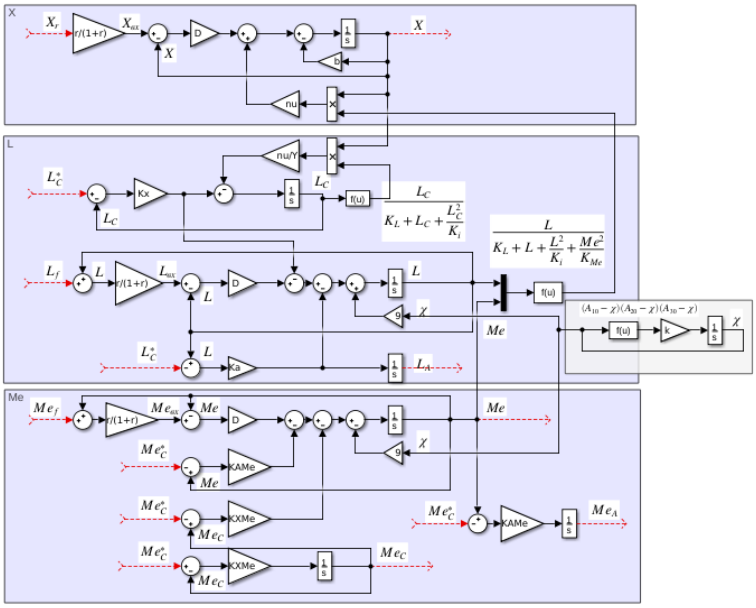


Рисунок 5 – Компьютерная модель биосорбционной очистки

При рассмотрении модели биосорбции как объекта управления (рис. 6), в качестве возмущающих входов принимаются концентрации загрязнений L_f, ИТМ Me_f и активного ила X_r. Соответствующие концентрации L, Me, X на выходах объекта следует отнести к управляемым. Управляющее воздействие представляет собой скорость подачи сточной воды v.

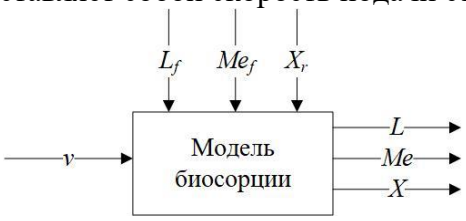
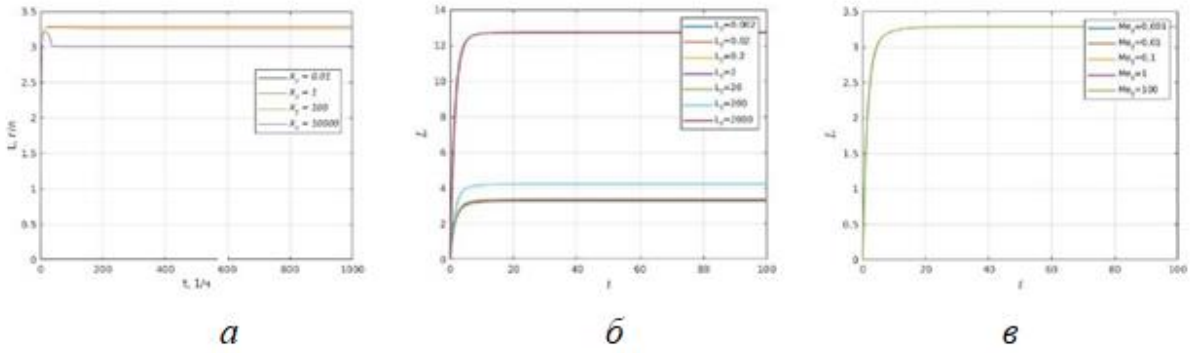


Рисунок 6 – Модель управляемого объекта

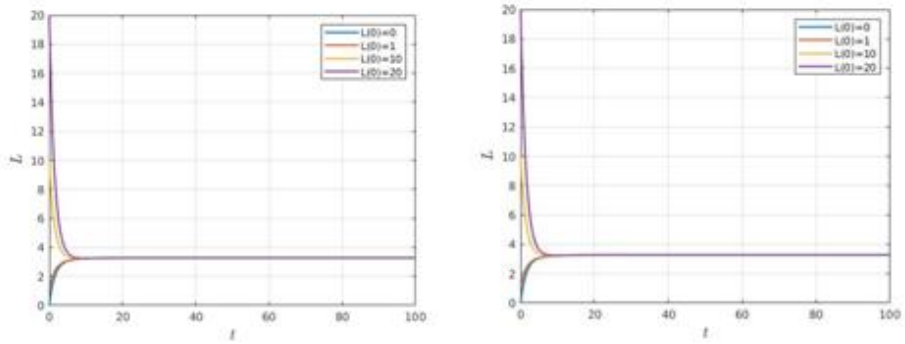
На рис. 7 представлены графики концентраций загрязнений L при изменении возмущений.



а *б* *в*

Рисунок 7 – Графики изменения концентрации загрязнений на выходе при изменениях: воздействия концентрации ила *(а)* концентрации загрязнений *(б)* концентрации ИТМ *(в)* на входе

Анализируя графики концентраций (рис. 7), можно установить, что при увеличении воздействия концентрации ила X_r, процесс очитки улучшается лишь в малой степени. При увеличении воздействия со стороны концентрации загрязнений L_f процесс очистки проходит ещё интенсивнее, т. е. разность между концентрацией загрязнений, воздействующих на объект, и установившейся концентрацией увеличивается при увеличении воздействия. Воздействия со стороны ИТМ *Me* не влияют на текущее значение концентрации загрязнений L.



а *б*

Рисунок 8 – Графики изменения концентрации загрязнений на выходе при изменения начальной концентрации загрязнения *(а),* начальной концентрации ила *(б)*

Рассмотрев изменения концентраций при разных начальных значениях (рис. 8), было установлено, что начальные значения концентрации загрязнений в биосорбере $L(0)$ не влияют на значения загрязнений в установившемся режиме L на выходе объекта.

Анализ изменения выходных переменных объекта в зависимости от изменения скорости *v* подачи сточной воды представлен семейством графиков на рис.9.

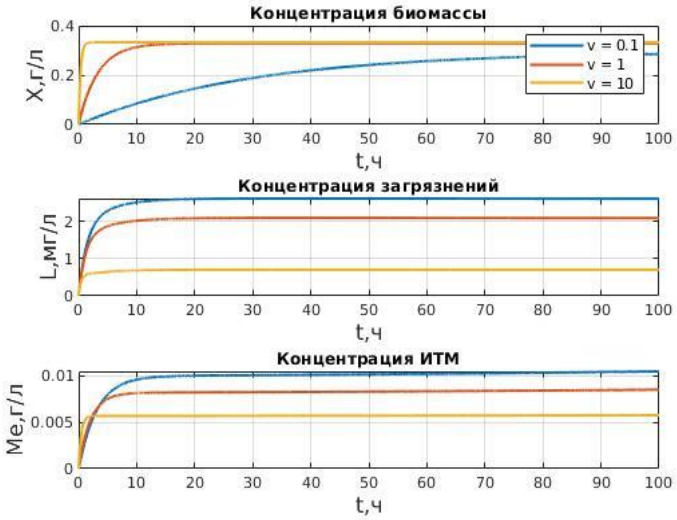


Рисунок 9 – Динамика изменения выходных сигналов, при изменении скорости подачи стока.

Из полученных результатов модельного эксперимента (рис. 9) можно отметить, что концентрация ила *X* в установившемся режиме не зависит от изменения скорости *v*, тогда как изменения концентрации суммарных загрязнений *L* и ИТМ *Me* в установившемся режиме уменьшается при увлечении скорости *v*.

Синтез системы регулирования расходом сточной воды

Простейшим способом управления процессами биоочистки в биосорбере является регулирование скоростью подачи сточной воды в аппарат. Так как регулирование будет производиться по расходу стоков *Q,* насосная установка будет входить в состав объекта управления (рис. 10).

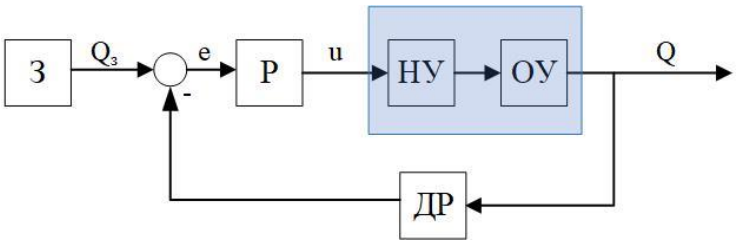


Рисунок 10 – Функциональная схема регулирования расходом сточной воды: *ОУ – объект управления; НУ – насосная установка; Р – регулятор;*

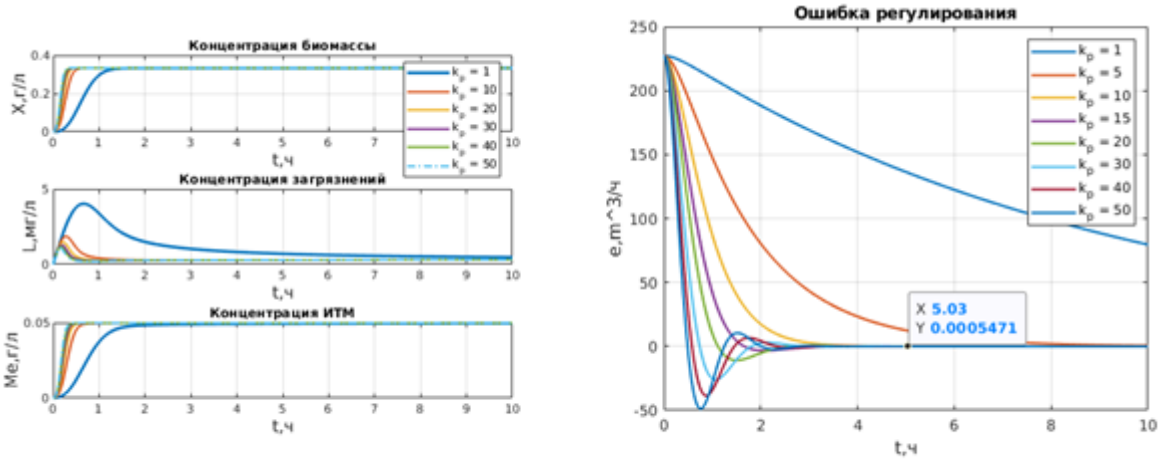
ДР – датчик расхода; З – задатчик

Помимо ценовой характеристики, к насосной установке предъявляется требование − насос должен иметь возможность перекачивать плотную, густую жидкость, с средним расходом не менее 1м^3/ч. Для этих целей помимо стандартного винтового насоса, подходят такие насосы, как перистальтический и шламовый. Например, можно рекомендовать шламовый насос ШН 250-34 с напряжением питания 380В и максимальным расходом 250 м^3/ч. В обратной связи необходимо установить расходомер, который может работать с густой неоднородной жидкостью. Для этих целей подходит ультразвуковой расходомер, например ПИР RF5107 или LUXUS F608.

Для вычислительных экспериментов был выбран регулятор с пропорциональным законом управления. При изменении коэффициента настройки регулятора были получены семейства

графиков изменения концентраций на выходах биосорбера (рис. 11 а), так же семейство графиков ошибки регулирования расходом (рис. 11 б).

Исходя из проведенных экспериментов, можно сделать заключение, что управляя расходом, наилучшее (оптимальное) решение достигается при использовании П-регулятора с коэффициентом k_p = 10. Установившаяся ошибка при заданных значениях параметров будет равна $e_{уст} = 0,05\%$.



а *б*

Рисунок 11 – Графики изменения переходного процессов изменения концентраций на выходах биосорбера *(а)* и ошибки регулирования *(б)* при различных настройках регулятора

Таким образом, управляя только расходом сточной воды, поступающей в аппарат, появляется возможность влиять на динамические характеристики системы управления, например, уменьшить время переходного процесса концентраций биомассы, загрязнений и отдельно ИТМ. Однако, регулируя только расход сточной воды, не возможно влиять на установившееся значение концентрации активного ила в биосорбере. Поэтому существует необходимость разработки многомерной системы регулирования. Только увеличивая количество управляемых величин в системе, можно достичь необходимого качества управления.

Заключение

В результате анализа различных методов биологической очистки промышленных сточных вод были установлены преимущества биосорбционной технологии, которые заключаются в повышенной скорости очистки воды, высокой эффективности удаления из воды веществ, устойчивых к биохимическому окислению, уменьшении влияния «залповых» нагрузок на работу очистных сооружений.

В ходе вычислительного эксперимента была произведена модификация известной математической модели биосорбционной очистки.

Система регулирования по расходу обратного потока активного ила позволяет увеличивать или уменьшать концентрацию загрязнений, но не дает возможности влиять на концентрацию ила, что требует создания многомерной системы регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ручай Н.С., Маркевич Р.М. Экологическая биотехнология: учеб. пособие. Минск: Изд-во БГТУ, 2006. 312 с.

2. Шулаев М.В. Научные основы обезвреживания жидких отходов гальванических и металлообрабатывающих производств с использованием анаэробной биосорбционной технологии: дисс. доктора техн. наук / Казан. гос. ун-т, Казань, 2009.

3. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1979. 119 с.

4. Грудяева Е.К., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 222 с.

5. Ветошкин А.Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы): учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 325 с.

6. Тарасова Е.В. Очистка сточных вод машиностроительных предприятий // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. вып. № 1(9), С. 170 – 174.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-80-89

Обухова Елена Николаевна

Донской государственный технический университет

СИНТЕЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Аннотация. *В статье представлена нелинейная математическая модель пневмосистемы, состоящая из уравнения динамики движения поршня, а так же уравнений формирования давлений в камерах пневмоцилиндра. Рассмотрены существующие методы управления подобными системами. Проведен синтез законов управления методом АКАР, так же представлены графики изменения фазовых координат системы и управляющих воздействий. Приведен сравнительный анализ нелинейного синергетического регулятора и линейного ПИД-регулятора полученного классическим методом типовых регуляторов.*

Ключевые слова: *пневматическая система, математическая модель, закон управления, метод АКАР, инвариантное многообразие.*

Annotation. *The article presents a nonlinear mathematical model of the pneumatic system, consisting of the equation of the dynamics of the piston, as well as the equations of formation of pressures in the chambers of the pneumatic cylinder. The comparative analysis of existing methods of management of similar systems is considered. The synthesis of control laws by the AKAR method is carried out, the graphs of changes in the phase coordinates of the system and control actions are also presented. A comparative analysis of the nonlinear synergetic controller and linear PID controller obtained by the classical method of typical regulators is presented.*

Keywords: *pneumatic system, mathematical model, control law, ACAR method, invariant variety.*

Введение.

Физическое свойство сжимаемости воздуха и присущая нелинейность математической модели продолжают делать пневматическую систему объектом многих как отечественных, так и зарубежных исследований.

Помимо использования классических линейных законов управления, проводились исследования с использованием методологии оптимального управления, а так же современного аппарата нечеткой логики и нейронных сетей.

Таким образом, управление пневматической системой с позиции теории автоматического управления можно разделить на определенные группы методов к которым относятся: методы подчиненного управления, основанные на использовании линейных типовых законах управления; методы оптимального управления, ориентированные на представлении системы в фазовом пространстве и построении поверхностей переключения; интеллектуальные методы построения регуляторов с использованием нечеткой логики и нейронных сетей.

Проведенный анализ работ [1-4] показал, что при синтезе алгоритмов управления пневматическими системами, разработчик сталкивается с достаточно сложным аналитическим описанием термодинамических процессов, связанных с нелинейным движением воздуха проходящего через отверстия пневматического распределителя. Поэтому для упрощения математических моделей в работах применялись такие допущения как линеаризация «не удобных» нелинейных зависимостей, понижение размерности системы, а так же введение дополнительных поправочных коэффициентов и дальнейшего исследования линейной пневматической системы.

При этом, применение методов нечеткой логики и нейронных сетей для настройки регуляторов связано с такими трудностями как длительный процесс «обучения» регулятора, возникновение ошибки регулирования при изменении входных воздействий, не участвующих в обучении сигналов, громоздкость базы нечётких правил, отсутствие формализованного математического описания закона управления.

В данной статье предлагается рассмотреть синтез законов управления с использованием метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), разработанного в научном коллективе под руководством профессора А.А. Колесникова.

Математическая модель электропневматической системы.

В основу концепции синергетической теории управления положен метод АКАР, который позволяет в аналитической форме синтезировать законы управления для нелинейных, многомерных, многосвязных объектов к которым относится пневматическая система (ПС).

Анализируя математическую модель ПС и полученные временные характеристики ее фазовых координат, представленные в ранее опубликованных работах, можно сделать вывод, что исследуемая динамическая система является непрерывной автономной диссипативной системой, с сосредоточенными параметрами и описывается системой нелинейных ДУ:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \dfrac{dx_2}{dt} = \dfrac{1}{M}\cdot\left(S_1 x_3 - S_2 x_4 - k_{\text{Втр}}\cdot x_2 - P_a\left(S_1 - S_2\right) - N\right); \\ \dfrac{dx_3}{dt} = \dfrac{kU_1\sqrt{RT_{\text{м}}}}{S_1\left(x_1 + l_{01}\right)\sqrt{\xi}}\cdot\sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2} - \dfrac{kx_3x_2}{\left(x_1 + l_{01}\right)} \\ \dfrac{dx_4}{dt} = -\dfrac{kU_2\sqrt{RT_{\text{М}}}}{S_2\left(L - x_1 + l_{02}\right)\sqrt{\xi}}\cdot\left(\dfrac{x_4}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\cdot\sqrt{x_4^2 - p_{\text{А}}^2} + \dfrac{kx_4x_2}{\left(L - x_1 + l_{02}\right)}. \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 – координата перемещения поршня l . ; x_2 . – скорость перемещения движущихся масс V ; x_3. – давление в камере наполнения p_1; x_4 – давление в камере слива p_2; M . – масса подвижной части поршня и штока, включая массу объекта управления, который механически связан со штоком; S_1 и S_2 – эффективные площади поршневой штоковой полостей пневмоцилиндра соответственно; $k_{Втр}$ – коэффициент вязкого трения; N – статическая нагрузка; $T_м$ – абсолютная температура газа; k – показатель адиабаты для воздуха; R – универсальная газовая постоянная; l_{01} – начальнаяоордината положения поршня; l_{02} – конечная координата положения поршня; ξ – суммарный коэффициент сопротивления входящих в линию дросселей, $p_м$ уровень давления на входе магистрали; p_a – атмосферное давление. Управлениями $u_1 и\ u_2$ являются площади проходных сечений пневмораспределителя f_1 и f_2 в первой и второй камере пневмоцилиндра, которые находятся в правых частях математической модели (1).

Д более компактного представления математической модели ПС и дальнейших эргономичных математических преобразований, введем следующие коэффициенты: $a_{21} = \dfrac{S_1}{M}$;

$a_{22} = \dfrac{S_2}{M}; a_{23} = \dfrac{k_{Втр}}{M}; a_{24} = \dfrac{P_a\left(S_1 - S_2\right)}{M};\quad a_N = \dfrac{N}{M};\ :\ a_{31} = \dfrac{k\sqrt{RT_м}}{S_1\sqrt{\xi}};\ a_{41} = \dfrac{k\sqrt{RT_м}}{S_2\sqrt{\xi}};\ a_{42} = \left(L + l_{02}\right).$

После введенных коэффициентов ММ будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \dfrac{dx_2}{dt} = a_{21}\cdot x_3 - a_{22}\cdot x_4 - a_{23}\cdot x_2 - a_{24} - a_N; \\ \dfrac{dx_3}{dt} = \left[a_{31}\cdot\left(x_1 + l_{01}\right)^{-1}\cdot U_1\cdot\sqrt{p_{\text{м}}^2 - x_3^2}\right] - \dfrac{kx_3x_2}{\left(x_1 + l_{01}\right)}; \\ \dfrac{dx_4}{dt} = -\left[a_{41}\cdot\left(a_{42} - x_1\right)^{-1}\cdot U_2\cdot\left(\dfrac{x_4}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\cdot\sqrt{x_4^2 - p_{\text{A}}^2}\right] + \dfrac{kx_4x_2}{\left(a_{42} - x_1\right)}. \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку все переменные состояния объекта, такие как перемещение и скорость штока, давления в камерах наполнения и слива изменяются при подаче входных воздействий и доступны измерению с помощью соответствующих датчиков, то можно судить о полной управляемости и наблюдаемости объекта.

Синтез нелинейного регулятора.

Рассмотрим случай двухканального управления положением поршня пневмопривода x_1, путем изменения давлений в полостях x_3 и x_4.

С позиции синергетической теории управления это означает, что необходимо синтезировать такой вектор управляющих воздействий $u_1\left(x_1, x_2, x_3, x_4\right)$, и $u_2\left(x_1, x_2, x_3 x_4\right)$ – представляющий собой функцию фазовых координат, который переводил бы изображающую точку системы из начального состояния, находящуюся в области допустимых значений, в требуемое конечное состояние, при условии соблюдения требуемых критериев качества [5-7].

Исходя из технологической задачи позиционирования штока пневмоцилиндра на требуемом положении, введем первый инвариант, соответствующий цели управления:

$$x_1 = x_1^*, \quad (3)$$

где x_1 – текущее положение штока, а x_1^* – требуемое значение.

Вторым инвариантом системы будем считать условие:

$$x_4 = x_4^*, \quad (4)$$

соответствующее задаче стабилизации давления в камере слива.

Исходя из того, что управляющее воздействие $u_1(x_n)$, влияет на динамику изменения давления x_3, а управляющее воздействие $u_2(x_n)$ – на динамику изменения давления x_4, то целесообразно ввести следующую совокупность инвариантных многообразий:

$$\begin{cases} \psi_1 = x_4 - x_4^* = 0 \\ \psi_2 = x_3 - \varphi_1\left(x_1, x_2\right) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Во второе многообразие входит некоторая функция $\varphi_1\left(x_1, x_2\right)$, которая определяет желаемый характер изменения давления x_3 на пересечении инвариантных многообразий $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$. Функция $\varphi_1\left(x_1, x_2\right)$, определяется в ходе процедуры синтеза законов управления, исходя из условий выполнения инварианта (2).

Согласно методу АКАР, макропеременные ψ_1 и ψ_2 должны удовлетворять решению системы основных функциональных уравнений:

$$\begin{cases} \mathrm{T}_1\dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0, \\ \mathrm{T}_2\dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $T_1 > 0$ и $T_2 > 0$ обеспечивают условия асимптотической устойчивости движения системы.

При попадании изображающей точки системы на пересечение многообразий $\psi_1 = \psi_2 = 0$ происходит точная динамическая декомпозиция системы (1) и динамика замкнутой системы описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \dfrac{dx_2}{dt} = a_{21} \cdot \varphi_1(x_1, x_2) - a_{22} \cdot x_4^* - a_{23} \cdot x_2 - a_{24} - a_N. \end{cases} \quad (7)$$

Функцию $\varphi_1(x_1, x_2)$, в декомпозированной системе (7) можно рассматривать как «внутреннее» управление.

На втором этапе синтеза для поиска управления и, следовательно, определения функции $\varphi_1(x_1, x_2)$, вводится дополнительное инвариантное многообразие, которое должно обеспечить устойчивость замкнутой системы и выполнение технологического инварианта (2). Введем многообразие:

$$\psi_3 = x_2 - k\left(x_1 - x_1^*\right) = 0. \quad (8)$$

Динамика системы на этом многообразии описывается следующим уравнением:

$$\frac{dx_1}{dt} = k\left(x_1 - x_1^*\right), \quad (9)$$

условием устойчивости, которого относительно $x_1 = x_1^*$, является неравенство $k < 0$.

Для того, чтобы выполнялось условие $\psi_3 = 0$ макропеременная ψ_3 должна удовлетворять решению функционального уравнения:

$$\mathrm{T}_3\dot{\psi}_3 + \psi_3 = 0, \quad (10)$$

где $T_3 > 0$ условие асимптотической устойчивости движения изображающей точки системы к инвариантному многообразию.

Подставим (8) в (10) для определения внутреннего управления φ_1:

$$\mathrm{T}_3(\dot{x}_2 - k\dot{x}_1) + x_2 - k\left(x_1 - x_1^*\right) = 0. \quad (11)$$

Далее в уравнение (11) подставляются уравнения декомпозированной системы (7) в результате чего получается выражение:

$$\mathrm{T}_3\left[\left(a_{21}\varphi_1(x_1, x_2) - a_{22}x_4^* - a_{23}x_2 - a_{24} - a_N\right) - kx_2\right] + x_2 - k\left(x_1 - x_1^*\right). \quad (12)$$

Выразим внутреннее управление φ_1 из выражения (12):

$$\varphi_1 = a_{21}^{-1} \cdot \left[a_{22}x_4^* - a_{23}x_2 - a_{24} - a_N + kx_2\right] - (T_3 a_{21})^{-1} \cdot \left[x_2 - k\left(x_1 - x_1^*\right)\right]. \quad (13)$$

Искомый закон управления находится как совместное решение системы уравнений (6), 7) и (13) и имеет следующий вид:

$$U_1 = \frac{\left(x_1 + l_{01}\right)}{T_2 a_{31} \cdot \left(p_{\text{м}}^2 - x_3^2\right)^{0,5}} \cdot \frac{T_2 k x_3 x_2}{\left(x_1 + l_{01}\right)} - \frac{T_2}{a_{21}}\left(a_{21}x_3 - a_{22}x_4 - a_{23}x_2 - a_{24} - a_N\right) \cdot \left(k - a_{23} - \frac{1}{T_3}\right)$$
$$+ \frac{T_2 k x_2}{T_3 a_{21}} - x_3 + \frac{1}{a_{21}} \cdot \left[a_{22}x_4^* - a_{23}x_2 - a_{24} - a_N + kx_2\right] + \frac{1}{T_3 a_{21}} \cdot \left[x_2 - k\left(x_1 - x_1^*\right)\right] \quad (14)$$

$$U_2 = \frac{-x_4^* a_{42} + T_1 k x_4 x_2 + x_4 a_{42} - x_4 x_1 + x_4^* x_1}{\mathrm{T}_1 a_{41} \cdot \left(x_4 / P_m\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{(x_4^2 - p_{\text{A}}^2)}}. \quad (15)$$

Для анализа поведения замкнутой системы, с учетом полученного в аналитической форме закона управления, было проведено компьютерное моделирование системы. При моделировании

использовались параметры пневмоцилиндра компании Camozzi серии QCT2A032A200, имеющего следующие характеристики представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры моделируемой пневматической системы

Параметр	Значение	Параметр	Значение
M	0,5 кг	k	1,4
S_1	0,008 м^2	R	287 (Дж/(кг · К))
S_2	0,006 м^2	$T_м$	293 К
$k_{Втр}$	1000	P_a	100000 Па
L	0,2 м	$P_м$	500000 Па
$l_{01} = l_{02}$	0,002 м	$\xi_1 = \xi_2$	30

На рисунке 1-3 представлены результаты моделирования системы с законами управления (14), (15) в среде пакета Maple, с начальными условиями системы: $x = [0, 0, 100000, 100000]$ и заданными значениями перемещения $x_1^* = 0,1м.$ и давления в выпускной камере $x_4^* = 120кПа$.

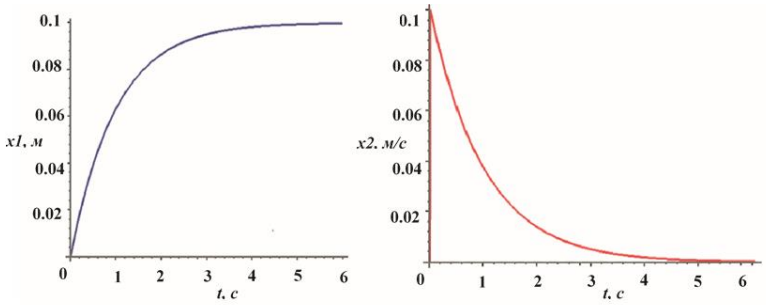


Рисунок 1. – Переходные процессы: а) по перемещению штока в $x_1^* = 0,1м.$;

б) по скорости x_2.

По графикам переходных процессов, представленным на рисунке 1, видно, что положение штока достигает заданного значения инварианта (2) за время равное 6 секунд (рис. 1а), что свидетельствует от адекватности синтезированного закона управления.

График изменения скорости штока пневмоцилиндра (рис. 1б) показывает, что скорость, возрастая до максимума в начале движения цилиндра, уменьшается, принимая нулевого значения при достижении заданного перемещения.

Графики изменения давлений во впускной и выпускной камерах показаны на рисунке 2. Из них видно, давление x_3 в конце цикла движения несколько меньше x_4, что объясняется меньшим объемом впускной камеры из-за наличия в ней штока.

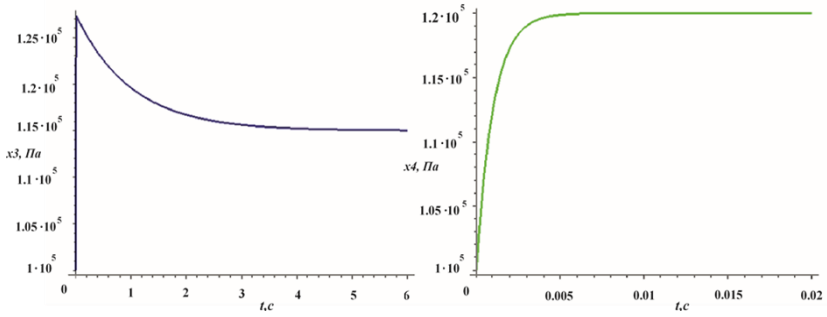


Рисунок 2. – Переходные процессы: а) по переменной x_3; б) по переменной x_4.

Синтезированные методом АКАР изменения управляющих воздействий во времени (13), представляющие собой площади поперечного сечения клапанов пневмораспределителя, представлены на рис. 3.

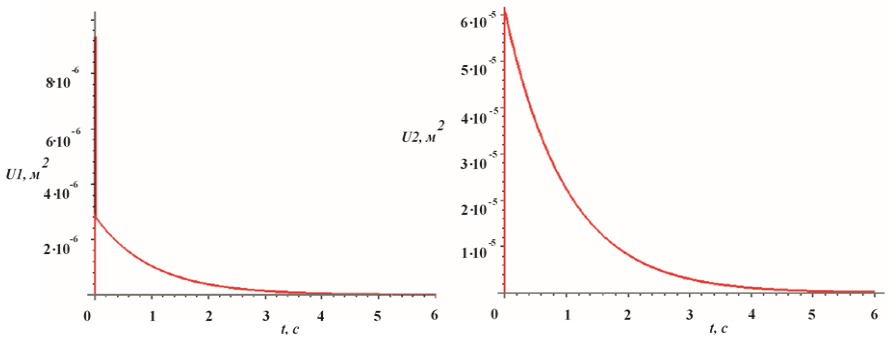


Рисунок 3. – Переходные процессы: а) по управлению u_1; б) по управлению u_2.

Синергетический синтез регулятора с согласованным управлением давлениями в камерах пневмопривода.

В приведенном выше варианте синтеза обеспечивается раздельное управление давлениями в камерах наполнения: одно из них непосредственно отвечает за позиционирование штока второе – стабилизируется в некотором заданном значении. Таким образом, один из каналов управления остается «пассивным» в решении технологической задачи. К тому же, стабилизируемое давление в камере может быть избыточным или недостаточным, что приводит к дополнительным затратам на его поддержание. В этой связи, целесообразно синтезировать векторный регулятор, обеспечивающий согласованное изменение давлений при позиционировании штока.

При полной остановке привода давления во впускной и выпускной камерах соответственно равны друг другу. Таким образом в ходе перемещения штока происходит выравнивание давлений. Можно отразить это выравнивание в соответствующем инвариантном многообразии в ходе процедуры синергетического синтеза. Для обеспечения этого условия необходимо ввести инвариант (4) вида:

$$x_4 = x_3, \tag{16}$$

Тогда совокупность вводимых инвариантных многообразий имеет вид:

$$\psi_1 = x_4 - x_3 = 0$$
$$\psi_2 = x_3 - \varphi_1(x_1, x_2) = 0 \tag{17}$$

Повторяя процедуру синтеза для введенных многообразий вида (17), получим закон управления изменения давления x_3 :

$$U_1 = \frac{T_2(\beta_1 + \beta_2 + \beta_4) - x_3 + \beta_5}{T_2\beta_3}, \tag{18}$$

где:

$$\beta_1 = -\frac{kx_2}{T_3(a_{22} + a_{21})}; \beta_2 = \frac{(T_3k + T_3a_{23} - 1)(a_{21}x_3 - a_{22}x_4 - a_{23}x_2 - a_{24} - a_N)}{T_3(a_{22} + a_{21})};$$

$$\beta_3 = \frac{a_{31}\sqrt{p_м^2 - x_3^2}}{x_1 + l_{01}}; \beta_4 = \frac{kx_3x_2}{(x_1 + l_{01})}; \beta_5 = \frac{T_3(kx_2 + a_N + a_{23}x_2 + a_{24}) + k(x_1 - x_1^*) - x_2}{T_3(a_{21} - a_{22})}.$$

А так же закон управления:

$$U_2 = \frac{T_1(\beta_3U_1 + \beta_4 + \beta_7) - x_4 + x_3}{-T_1\beta_6}, \tag{19}$$

где: $\beta_6 = \frac{a_{41}(x_4 / P_m)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{(x_4^2 - p_A^2)}}{a_{42} - x_1}$; $\beta_7 = \frac{kx_4x_2}{a_{42} - x_1}$.

На рисунке 4-6 представлены результаты моделирования системы с законами управления (18) и (19) в среде пакета Maple, с начальными условиями системы аналогичным первому случаю, но с другим заданными значением *давления в выпускной камере* $x_4^* = x_3$ при таком же перемещении $x_1^* = 0{,}1м.$

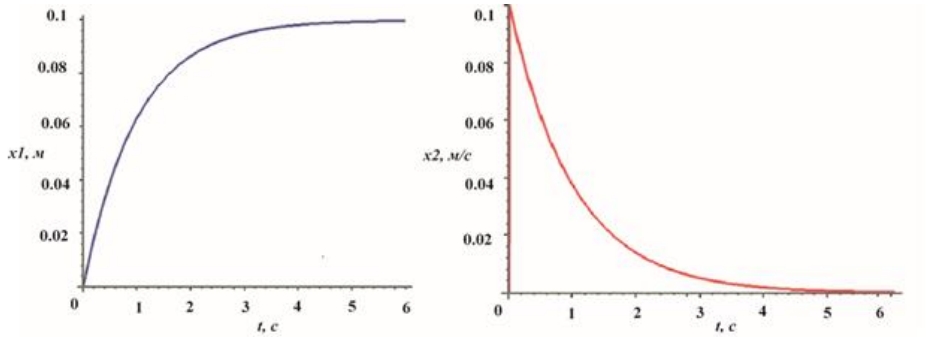


Рисунок 4. – Переходные процессы: а) по перемещению штока в $x_1^* = 0{,}1м.$; б) по скорости x_2.

Сравнительный анализ графиков переходных процессов, представленных на рис. 1 и 4 показывает, что процессы по перемещению и скорости в обоих случаях совпадают. Это значит, что динамика системы сохраняется не зависимо от изменения задачи управления.

Графики изменения давлений во впускной и выпускной камерах для второго случая показаны на рисунке 5. Из них видно, давление x_3 в конце цикла совпадает с давлением x_4, что и было задано при формировании инварианта.

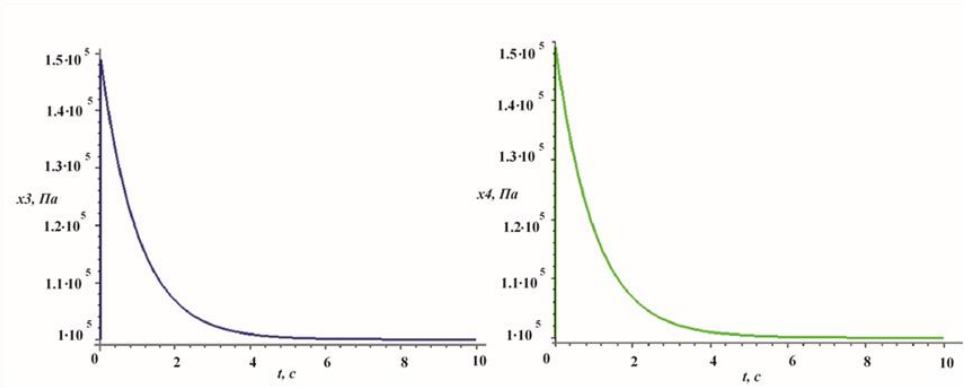


Рисунок 5. – Переходные процессы: а) по переменной x_3; б) по переменной x_4.

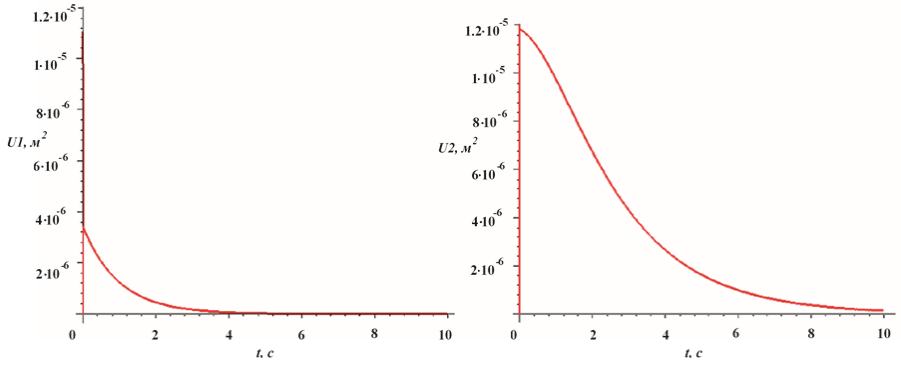


Рисунок 6. – Переходные процессы: а) по управлению u_1; по управлению u_2.

Синтезированные методом АКАР изменения управляющих воздействий во времени представлены на рисунке 6.

Анализ графиков переходных процессов, представленных на рисунках 3 и 6 показывает, что во втором случае площадь открытия клапана, впускающего поток сжатого воздуха, больше,

это приводит к росту рабочего давления (рис. 5а). При этом, за счет плавного уменьшения площади поперечного сечения выхлопного клапана (рис.6б), стабилизируются давления x_3 и x_4 до значения атмосферы (рис. 5).

Сравнительный анализ синергетического регулятора с подчиненным методом управления.

Проведем сравнительный анализ разработанного нелинейного синергетического регулятора с наиболее широко используемыми в пневмоавтоматике классическими линейными ПИД – регуляторами. Для этого проведем линеаризацию ММ пневматической системы (2) с использованием пакета Maple. На основе линейной системы ДУ была реализована структурная схема в среде пакета Simulink, представленная на рисунке 7.

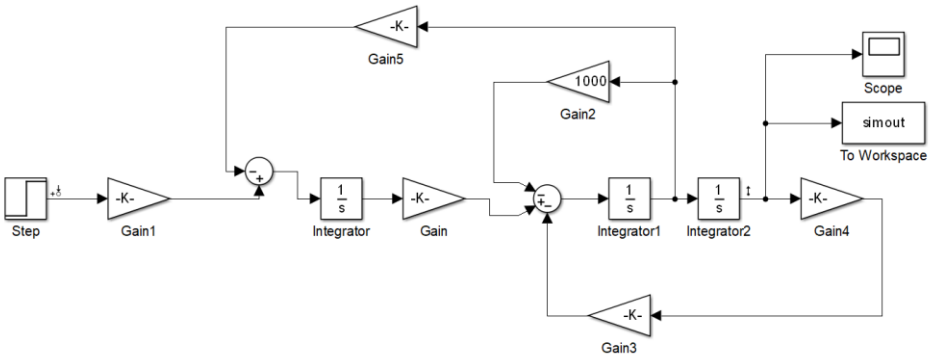


Рисунок 7. – Структурная схема линеаризованной пневматической системы.

Объект обладает астатизмом первого порядка благодаря естественной зависимости перемещения от скорости движения поршня. Поэтому с формальной точки зрения для получения астатической системы управления пневмоцилиндром, обладающей высокой статической точностью отработки ступенчатого входного воздействия, достаточно использовать П-регулятор, характеристика которого представлена на рисунке 8.

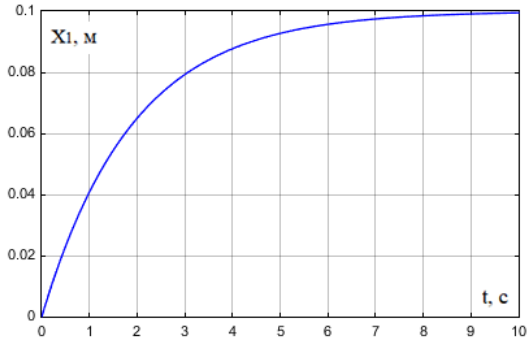


Рисунок 8. - Переходный процесс перемещения штока пневмопривода с П-регулятором (k=0,0003)

При более сложной форме входного сигнала, например при силовом возмущении и при учете силы трения, появляется статическая ошибка, избавиться от которой невозможно только изменением значения коэффициента усиления П-регулятора. Поэтому для эффективного противодействия возмущающим воздействиям управляющее устройство должно иметь интегральную составляющую закона управления. Это повысит порядок астатизма и улучшит отработку сложных входных сигналов, но при этом приведет к определённым проблемам, например появлению перерегулирования и возникновению опасных автоколебательных процессов. Несколько улучшить ситуацию позволит введение в управляющее устройство дифференцирующей составляющей, которая расширяет возможность выбора частоты среза

разомкнутой системы, тем самым нивелирует негативное влияние интегрирующей составляющей, но полностью исключить вероятность появления автоколебательных процессов не сможет. Это подтверждается графиком переходного процесса в системе с ПИД регулятором, показанным на рисунке 9.

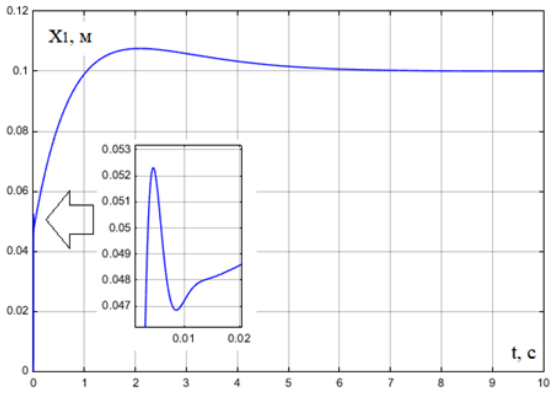


Рисунок 9. - Переходный процесс перемещения штока пневмопривода с ПИД-регулятором (k=0,001; Тд=0,5; Ти=2).

Сравнивая переходные процессы нелинейного регулятора, синтезируемого с применением метода АКАР (рис.4а) и линейного ПИД-регулятора (рис. 9) можно сделать вывод что затухание переходных процессов происходит примерно в одном временном диапазоне, составляющем 4-5 секунд. Однако при применении ПИД-регулирования в начальные моменты времени наблюдаются кратковременные колебания амплитуды штока привода.

Заключение.

На основе нелинейной модели пневмосистемы, с использованием синергетического метода АКАР, синтезированы законы управления, обеспечивающие перемещение штока пневмоцилиндра на заданное значение перемещения. Важным достоинством синтезированных нелинейных законов управления является возможность их получения аналитическим путем, с помощью совместного решения введенных макропеременных и функциональных уравнений, гарантирующих их устойчивость. Анализ переходных характеристик нелинейного регулятора, синтезируемого с применением метода АКАР и линейного ПИД-регулятора позволяет сделать вывод, что управление с синергетическим регулятором осуществляется более качественно, без перерегулирования и нежелательных всплесков выходной величины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Quevedo J. Digital control: past, present and future of PID control / J. Quevedo, T. Escobet // in Proc. IFAC Workshop, Terrassa, Spain, Apr. 5–7, 2000.

2. Денисенко В. ПИД -регуляторы: принципы построения и модификации / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. - 2007. - № 1. - С. 78-88.

3. Ayadi A. Modeling and sliding mode control of an electropneumatic system / A. Ayadi, S. Hajji, M. Smaoui, and A. Chaari. // In 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Palermo, Italy, June 2014, pp. 936-941.

4. Mu S. Experimental study on learning of neural network using particle swarm optimization in predictive fuzzy for pneumatic servo system / S. Mu, S. Shibata, T. Yamamoto, S. Goto, S. Nakashima, K. Tanaka // International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics ISAIR 2018: Cognitive Internet of Things: Frameworks, Tools and Applications pp. 323-332.

5. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – Изд. 2-е. – М.: Либроком, 2012. — 240 с.

6. Колесников, А. А. Современная прикладная теория управления: синергетический подход в теории управления / А. А. Колесников. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. — 68 с.

7. Kolesnikov A.A. Introduction of synergetic control // Proceedings of the American Control Conference ACC-2014, Portland, OR, USA, 4-6 June 2014. –pp. 3013-3016.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-90-101

Олейников Константин Анатольевич

Южный Федеральный Университет

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ МОТОР-КОЛЕСО-ДОРОЖНОЕ ПОКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Аннотация: *В работе рассматривается актуальная проблема синтеза законов нелинейного управления системой асинхронным мотором-колесо электромобиля. Рассматривается и описывается синтез законов управления асинхронным двигателем электропривода в зависимости от типа дорожного покрытия через коэффициент сцепления и проскальзывания с дорогой. Для решения задач управления использовалась нелинейная математическая модель системы асинхронный двигатель-колесо, решались задачи стабилизации угловой скорости и потокосцепления ротора, а также контроль тяги в зависимости от типа дорожного покрытия в задачах динамической стабилизации транспортного средства с использованием синергетической теории управления.*

Ключевые слова: *Синергетическая теория управления, АКАР, асинхронный электропривод, нелинейное управление, электромобиль, мотор-колесо, дорожное покрытие, контроль тяги, управление моментом.*

Annotation: *This paper presents the actual problem of synthesizing the laws of nonlinear control of an asynchronous motor-wheel electric vehicle system is considered. The synthesis and laws of controlling the induction motor of an electric drive are considered and described, depending on the type of road surface through the coefficient of adhesion and slippage with the road. To solve the control problems, a nonlinear mathematical model of the asynchronous engine-wheel system was used, the problems of stabilizing the angular velocity and rotor flux linkage were solved, as well as traction control depending on the type of road surface in the problems of dynamic stabilization of a vehicle using a synergistic control theory.*

Keywords: *Synergetic control theory, ADAR, asynchronous electric drive, nonlinear control, electric car, motor-wheel, road surface, traction control, torque control.*

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-00924 А).

Введение

В настоящее время во всём мире ведутся активные работы, направленные на создание экологичных транспортных средств-электромобилей и систем управления силовыми установками на их основе, экономичность которых обусловлена наличием рекуперации энергии с последующим ее использованием. Применение системы электрический мотор-колесо позволит улучшить кинематику транспортного средства, а также позволит отказаться от ряда конструктивных элементов, повысив эксплуатационные характеристики электромобиля, указанной на рисунке 1. Однако, несмотря на большую перспективу и заинтересованность разработчиков скорого внедрения и использования системы мотор-колесо (МК) на практике есть нерешенные задачи формирования комплектации каждого колеса, а также создание системы управления электромобилем, используя динамические характеристики формирования тяги в зависимости от сцепления с дорогой [1], [2].

Электромобиль комплектуемый МК имеет ряд преимуществ перед другими автомобилями [3]:

– Динамика: Крутящий момент достигается до 700 Н·м даже на низких оборотах;
– Маневренность за счет возможности различной скорости вращения всех колес;
– Универсальность использования;
– Эффективность распределение нагрузки между всеми МК;
– Повышенная курсовая устойчивость и проходимость за счет изменения крутящего момента и мощности двигателя;
– Повышенный общий КПД за счет меньшей массы.

Недостатками МК в свою же очередь являются:

– Необходимость создания сложной системы управления для взаимокоординирующей и эффективной работы всех МК;
– Сложность при ремонте, деформации, выхода из строя одного из МК для всей системы;
– Дороговизна и сложность обслуживания.

Рисунок 1 – Система мотор-колесо электромобиля

Описание математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Рассмотрим электрическую машину (ЭМ) – подсистему электромобиля, у которой в каждом из четырех колёс размещен асинхронный электропривод. Многофазная ЭМ асинхронного электропривода с фиксированным числом обмоточных фаз ротора и статора может быть представлена в виде ЭМ с двумя фазами, если выполняются равенства полных сопротивлений фаз ротора (статора) .

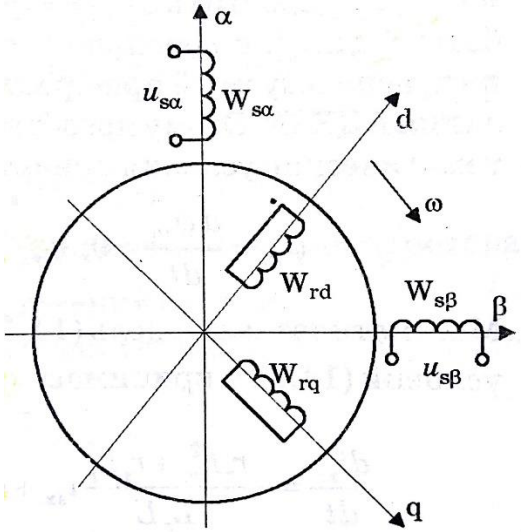


Рисунок 2 – Структура обобщённой ЭМ

В качестве ЭМ рассмотрим часто используемый асинхронный электропривод с короткозамкнутым ротором (АДКЗР). На рисунке 2 показана общая структура привода, где w_{rd}, w_{rq} – число витков обмотки ротора по осям d, q, $w_{s\alpha}, w_{s\beta}$ – число витков обмоток статора по осям α, β; $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – напряжения на обмотках статора фаз α, β; u_{rd}, u_{rq} – напряжения обмоток ротора фаз d, q; w – угловая скорость вращения ротора. Используя общую математическую модель двигателя в системе координат (*x*, *y*) получим в следующем виде: [4], [5]

$$\begin{aligned}
\frac{di_{sx}}{dt} &= \frac{L_m r_r \psi_r - (r_r L_m^2 + r_s L_r^2) i_{sx} + L_r^2 u_{sx}}{L_r L} + w_r i_{sy} + \frac{r_r L_m i_{sy}^2}{L_r \psi_r}; \\
\frac{di_{sy}}{dt} &= -\frac{L_m r_r w_r \psi_r - (r_r L_m^2 + r_s L_r^2) i_{sy} + L_r^2 u_{sy}}{L_r L} - w_r i_{sx} - \frac{r_r L_m i_{sx} i_{sy}}{L_r \psi_r}; \\
\frac{d\psi_r}{dt} &= \frac{r_r L_m}{L_r} i_{sx} - \frac{r_r}{L_r} \psi_r; \\
\frac{dw_r}{dt} &= \frac{pmL_m}{2L_r J} \psi_r i_{sy} - \frac{M_c}{J}.
\end{aligned} \qquad (1)$$

где i_{sx} и i_{sy} – проекции тока статора на оси X и Y соответственно, u_{sx} и u_{sy} – проекции напряжения статора на оси X и Y, L_r и L_s – индуктивности ротора и статора, L_m – взаимная индуктивность, p – число пар полюсов, m – число фаз, M_c – момент сопротивления, J – приведенный момент инерции, ψ_r – потокосцепление ротора, w_r – частота вращения ротора, r_r и r_s – сопротивления ротора и статора.

Синтез регулятора стабилизации скорости вращения и стабилизации

При расчетах и дальнейшем моделировании МК будем использовать среднее значение мощности, которое будет составлять 3.7 кВт, а параметры двигателя взяты из библиотеки элементов Matlab/Simulink.

Рассмотрим случай отсутствия нагрузки на валу двигателя, приняв отсутствие момента сопротивления($M_c = 0$):

Каналы управления представляю собой проекции напряжений u_{sx} и u_{sy}. Основными задачами построения регулятора являются стабилизация значений потокосцепления ψ_r ($\psi_r = \psi_r^0$) и частоты вращения ротора w_r ($w_r = w_r^0$), где w_r^0 и ψ_r^0 – желаемые значения.

Используя математическую модель (1) можно заметить что из системы дифференциальных уравнений через переменную i_{sx} мы влияем на потокосцепление ψ_r, а через i_{sy} можно влиять на частоту вращения w_r. Далее из системы на переменную i_{sx} можно воздействовать через канал управления u_{sx}, а на переменную i_{sy} можно воздействовать через канал управления u_{sy}, реализую тем самым двухканальный способ управления.

Согласно процедуре метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления, необходимо ввести первую пару макропеременных [6]-[9]:

$$\psi_1 = i_{sx} - \varphi_1; \tag{2}$$

$$\psi_2 = i_{sy} - \varphi_2, \tag{3}$$

которая должна удовлетворять основным функциональным уравнениям (ОФУ):

$$T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 = 0; \tag{4}$$

$$T_2 \frac{d\psi_2}{dt} + \psi_2 = 0. \tag{5}$$

Полученные законы управления u_{sx} и u_{sy} обеспечивают попадание изображающей точки на инвариантные многообразия $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$. В результате этого происходит динамическая декомпозиция исходной системы (1):

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_r}{dt} &= \frac{r_r L_m}{L_r}\varphi_1 - \frac{r_r}{L_r}\psi_r; \\ \frac{dw_r}{dt} &= \frac{pmL_m}{2L_r J}\psi_r \varphi_2. \end{aligned} \tag{6}$$

Из полученной системы (6) получаем выражения для «внутренних» законов управления φ_1 и φ_2. Вводем следующие макропеременные, определяющие желаемые достигаемые значения потокосцепления и частоты вращения ротора:

$$\psi_3 = \psi_r - \psi_r^0; \tag{7}$$

$$\psi_4 = w_r - w_r^0. \tag{8}$$

Данные макропеременные соответствуют дифференциальным уравнениям:

$$T_3 \frac{d\psi_3}{dt} + \psi_3 = 0; \tag{9}$$

$$T_4 \frac{d\psi_4}{dt} + \psi_4 = 0. \tag{10}$$

Решая совместно уравнения (7)-(10), находим выражения для «внутренних» законы управления φ_1 и φ_2:

$$\varphi_1 = \frac{T_3 r_r \psi_r - L_r \psi_r + \psi_r^0 L_r}{T_3 r_r L_m};$$
$$\varphi_2 = -2\frac{L_r J(w_r - w_r^0)}{T_4 p m L_m \psi_r}. \quad (11)$$

Для моделирования системы, а также для дальнейшего решения задач были использованы параметры асинхронного электродвигателя: $P = 3700$ Вт; $J = 0,2$ кг·м^2, L=0,0024694 Гн; $p = 2$; $m = 3$; $r_r = 1,083$ Ом; $r_s = 1,115$ Ом; $L_r = 0,2096$ Гн; $L_s = 0,2096$ Гн; $L_m = 0,2037$ Гн.

Зададим желаемые значения – инварианты системы: $\psi_r = 1$; $w_r = 100$.

Параметры регулятора следующие:

$T_1 = 0,1$, $T_2 = 0,3$, $T_3 = 0,8$, $T_4 = 0,8$.

На рисунках 3-6 представлены результаты моделирования в программе Maple с построенным регулятором

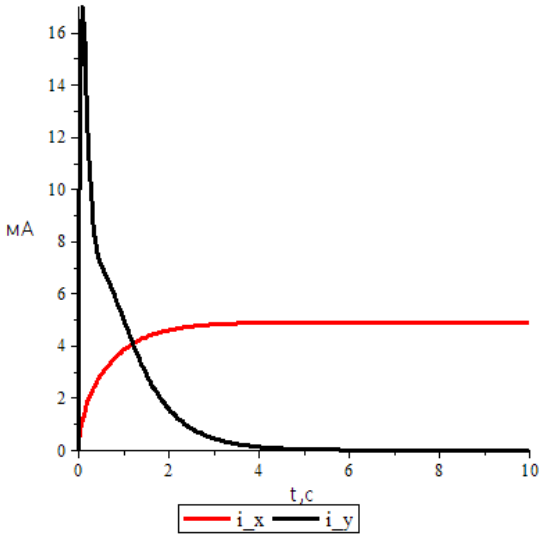


Рисунок 3 – Проекции токов на оси X и Y

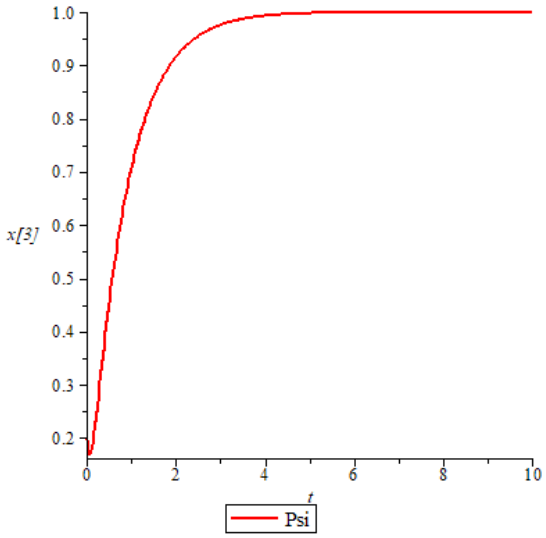


Рисунок 4 – Потокосцепление ротора

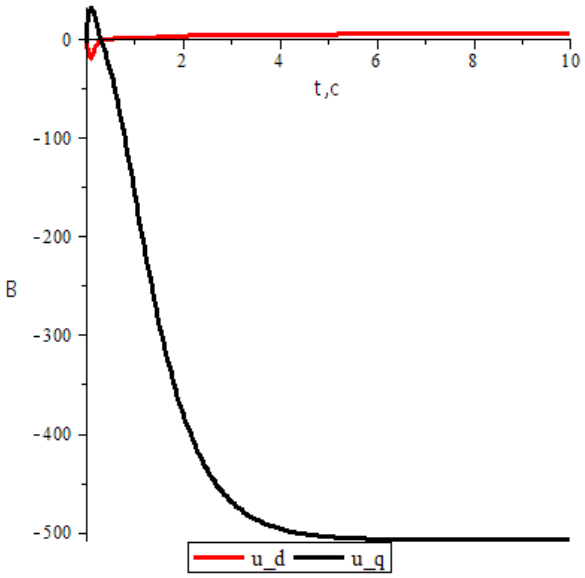


Рисунок 5 – Проекции напряжений на оси X и Y

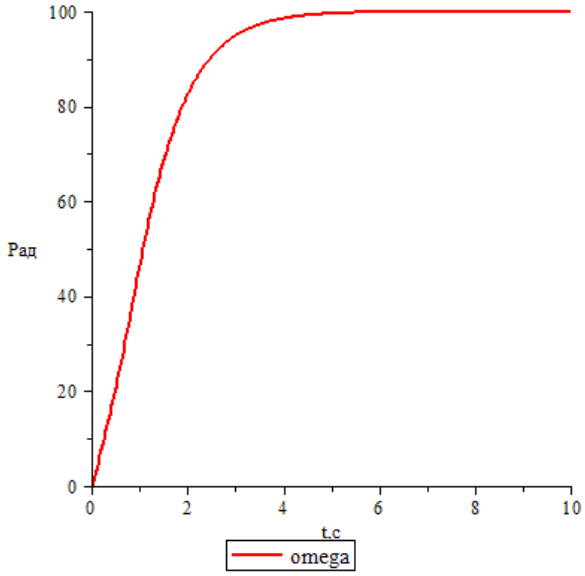


Рисунок 6 – Угловая скорость ротора

С учётом нагрузки на валу двигателя

Поскольку в системе мотор-колесо все колеса являются ведущими, то распишем динамику сил действующих на колесо. Для упрощения будем рассматривать равномерное движение, показанное на рисунке 7.

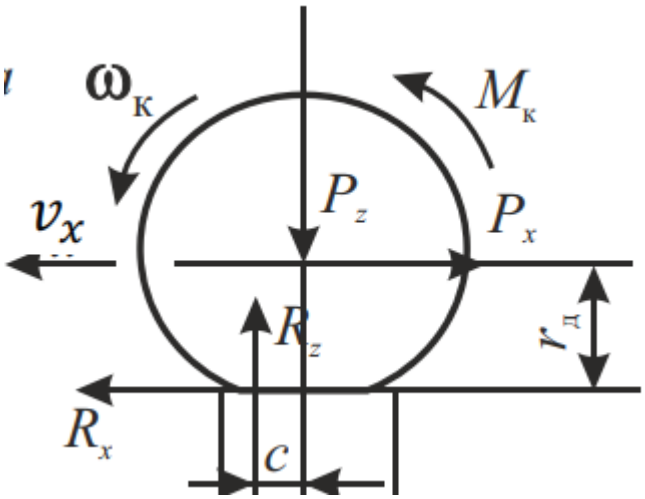


Рисунок 7 – Силы и моменты, действующие на ведущее колесо при его равномерном движении

Под действием крутящего момента M_k, подведенного к колесу от трансмиссии машины при ее равномерном движении, или пары продольных сил P_x и R_x, представляющих собой реакцию силы опоры корпуса рамы автомобиля и продольную реакцию опорной поверхности сцепления с дорогой, в результате которого колесо приводится в движение-скручивание в направлении его вращения [10], [11].

Движение электромобиля происходит в результате действия на МК различных сил. В первую очередь это силы за счет которых электромобиль приводится в движение и силы препятствующие этому движению. Основной движущей силой является сила тяги F_T, создающая крутящий момент на валу двигателя и приводящее МК в движение по опорной

поверхности. К противодействующим силам относятся сила трения и сила сопротивления качению. Рассматриваются силы, противодействующие движению автомобиля, влияющие на момент сопротивления.

Движение колеса начинается в результате приложения момента M_k или продольной силы P_x. Распределённую нагрузку можно заменить ее равнодействующей, то точка приложения силы R_z будет смещена по ходу движения колеса на расстояние c. В результате смещения точки приложения нормальной реакции R_z возникает момент сопротивления вращению колеса $R_z \cdot c$, который будет направлен в сторону, противоположную направлению вращения. Значит, чтобы уравновесить этот момент следует приложить к колесу крутящий момент M (если колесо ведущее), либо толкающую силу P_x, которая образует момент $P_x \cdot r_k$.

Уравнение моментов сил относительно точки A (точка соприкосновения контакта шины с дорогой)

$$P_x \cdot r_k = R_z \cdot c. \tag{12}$$

Выражаем продольную силу, необходимую для равномерного движения колеса:

$$P_x = R_z \cdot \frac{c}{r_k}, \tag{13}$$

где $\frac{c}{r_k}$ – коэффициент сопротивления качению k_r.

Для определения коэффициента сопротивления качению k_r в зависимости от скорости V электромобиля можно использовать следующую формулу:

$$k_r = k_{r0} \cdot (1 + \frac{V^2}{1500}), \tag{14}$$

где k_{r0} – коэффициент сопротивления качению движения электромобиля с относительно небольшой скоростью. Таблица значений данных сопротивления качению представлены в таблице 1.

Если рассматривать нагрузку без влияния динамики неравномерного движения, то на горизонтальной дороге сила реакция опоры R_z будет равна той части массы электромобиля, которая приходится на колесо G_k и момент сопротивления качению M_c будет равен:

$$M_c = k_r \cdot G_k \cdot r. \tag{15}$$

Таблица 1 – Значения усредненных коэффициентов сопротивления качению

Тип дорожного покрытия	Коэффициент сопротивления качению
Асфальт	0.007 … 0.015
Гравий	0.020 … 0.025
Булыжная дорога	0.025 … 0.030
Грунт	0.100 … 0.250
Песок	0.060 … 0.150
Снег	0.030 … 0.050
Лёд, обледенелая дорога	0.150 … 0.030

Промоделируем систему с параметрами дороги: лед (k_r=0.15)

Параметры регулятора были заданы следующим образом: $T_1 = 0,05,\ T_2 = 0,1,\ T_3 = 0,1,\ T_4 = 0,1.$

Инварианты системы остаются неизменные: $\psi_r = 1;\ w_r = 100.$

На рисунках 8-11 представлены результаты компьютерного моделирования с синтезированным регуляторам. Из графиков можно сделать вывод, что угловая скорость ротора w_r приобретает отрицательные значения в первые секунды, что говорит о влиянии негативном влиянии возмущений, а также состоянии покрытия дорожного покрытия.

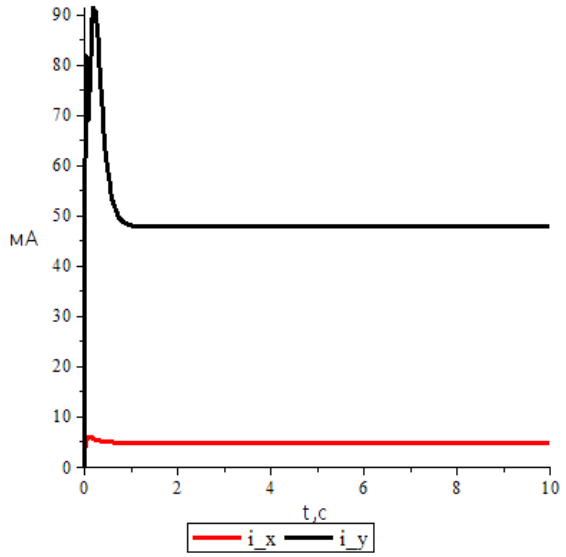


Рисунок 8 – Проекции токов на оси X и Y

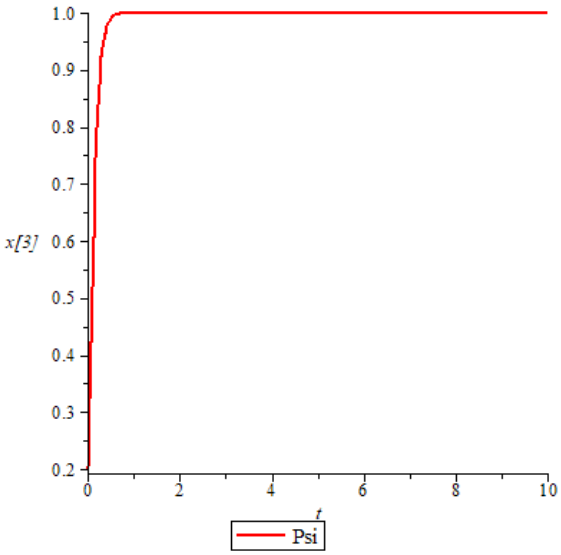


Рисунок 9 – Потокосцепление ротора

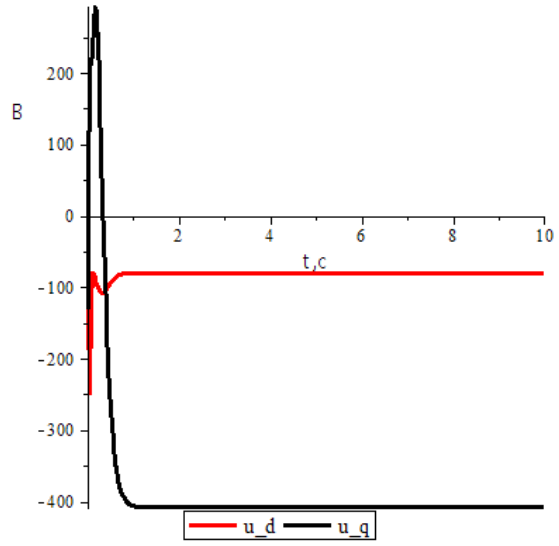


Рисунок 10 – Проекции напряжений на оси X и Y

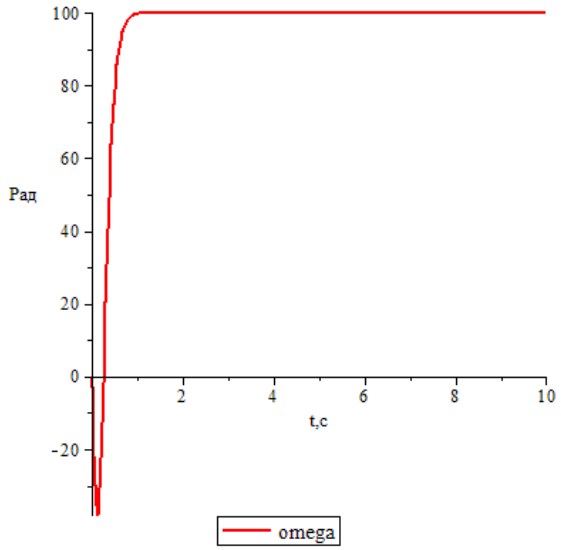


Рисунок 11 – Угловая скорость ротора

Синтез регулятора с применением принципа интегральной адаптации

Объект управления постоянно подвергается действию внешних возмущений, которые носят дестабилизирующий характер и выводят систему из желаемых показателей качества. Параметры объекта управления в определенных случаях также не являются постоянными, что приводит к нарушению робастности законов управления. Для синтеза законов управления и подавления типовых возмущений используется известный в синергетической теории управления принцип интегральной адаптации. Данный принцип заключается синтезе регулятора и оценке возмущения, которые обеспечивают компенсацию возмущений различных типов и сложности. Под возмущениями будем учитывать кусочно-постоянные возмущения вида $M_i^{\sup}(t) = M_{i0} sign\mu(t),$ где $M_{i0} = const$ – случайное изменение величины, а $\mu(t)$ – знакопостоянная функция. Для компенсации этих возмущений для синтеза регулятора с необходимыми показателями качества и подавлением возмущений необходимо включить дополнительную связь в системе уравнений – интегратор, реализуя тем самым астатический закон управления [12]-[14].

Согласно принципу интегральной адаптации система (1) дополняется оценкой возмущения z_1 и дополнительным уравнением в системе для синтеза внутренних законов управления во внутренние. Тогда математическая модель (1) примет вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{di_{sx}}{dt} = \frac{L_m r_r \psi_r - (r_r L_m^2 + r_s L_r^2) i_{sx} + L_r^2 u_{sx}}{L_r L} + w_r i_{sy} + \frac{r_r L_m i_{sy}^2}{L_r \psi_r};\\
&\frac{di_{sy}}{dt} = -\frac{L_m r_r w_r \psi_r - (r_r L_m^2 + r_s L_r^2) i_{sy} + L_r^2 u_{sy}}{L_r L} - w_r i_{sx} - \frac{r_r L_m i_{sx} i_{sy}}{L_r \psi_r};\\
&\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{r_r L_m}{L_r} i_{sx} - \frac{r_r}{L_r} \psi_r;\\
&\frac{dw_r}{dt} = \frac{pmL_m}{2L_r J} \psi_r i_{sy} - z_1;\\
&\frac{dz_1}{dt} = \eta_1 (w_r - w_r^0),
\end{aligned} \qquad (16)$$

где z_1 – оцениваемое внешнее возмущения, η_1 – некоторое положительное скалярное число. γ – малая положительная величина.

Используя метод АКАР происходит динамическая декомпозиция исходной системы (16). Тогда декомпозированная система будет представлять следующий вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{r_r L_m}{L_r} \varphi_1 - \frac{r_r}{L_r} \psi_r;\\
&\frac{dw_r}{dt} = \frac{pmL_m}{2L_r J} \psi_r \varphi_2;\\
&\frac{dz_1}{dt} = \eta_1 (w_r - w_r^0).
\end{aligned} \qquad (17)$$

Для моделирования использовались те же параметры, что при моделировании нагрузки: ледовое покрытие (коэффициент сопротивлению качению $k_{r0} = 0{,}15$), число $\eta = 1,\ \gamma = 0{,}01;$

Заданные желаемые значения потокосцепления и ротора: $\psi_r = 1;\ w_r = 100.$

Параметры синергетического регулятора также остались неизменными: $T_1 = 0{,}05$ $T_2 = 0{,}1,\ T_3 = 0{,}1,\ T_4 = 0{,}1.$

Результаты компьютерного моделирования показаны на рисунках 12-15:

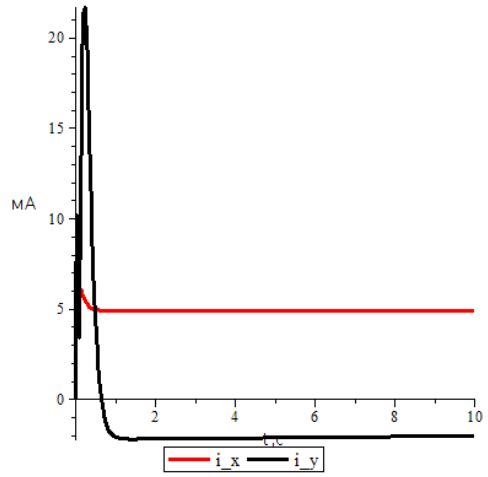


Рисунок 12 – Проекции токов на оси X и Y

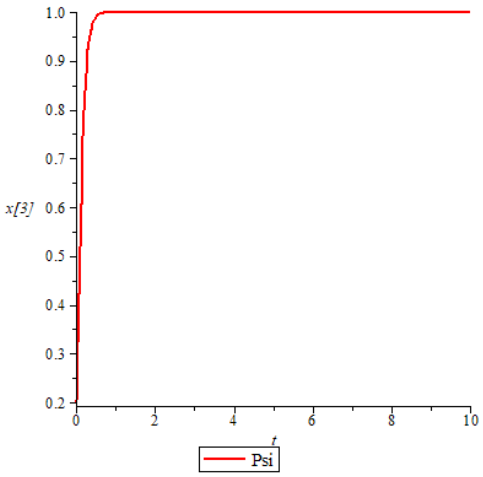


Рисунок 13 – Потокосцепление ротора

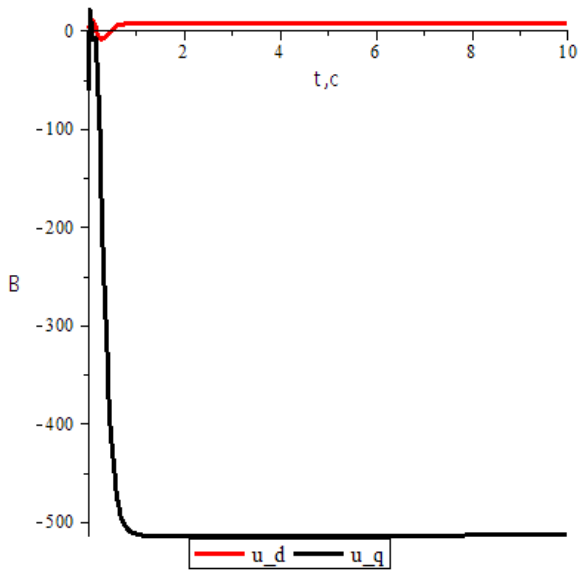


Рисунок 14 – Проекции напряжений на оси X и Y

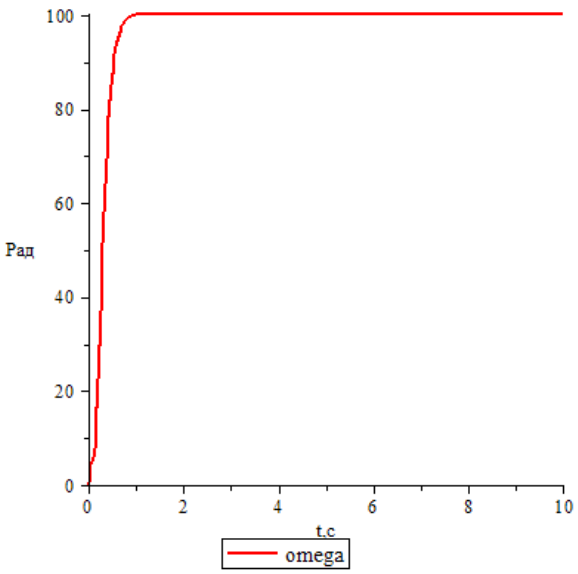


Рисунок 15 – Угловая скорость ротора

Из графиков следует что все показатели качества выполняются, а возмущения эффективно подавляются согласно принципу интегральной адаптации. Следует заметить, что величина γ влияет на перерегулирование системы угловой частоты ротора и насколько интегратор «подавляет» статическую ошибку. На рисунках 16-17 показаны значения угловой частоты ротора w_r при $\gamma = 0.05$ и $\gamma = 1$.

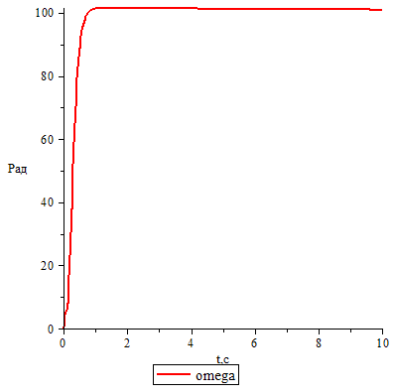


Рисунок 16 – Угловая частота ротора при $\gamma = 0.05$

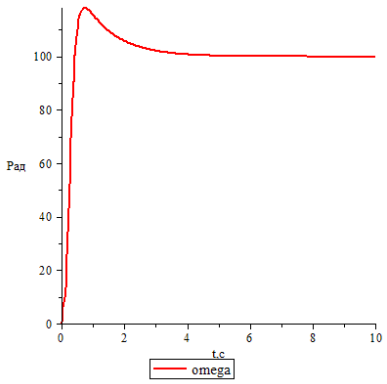


Рисунок 17 – Угловая частота при $\gamma = 1$

Заключение

Таким образом в статье был получен важный научный результат – были синтезированы нелинейные законы управления системой мотор-колесо, решены задачи стабилизации вектора потокосцепления и угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя, а также стабилизации тяги транспортного средства в зависимости от типа дорожного покрытия Полученные результаты показывают перспективность подхода АКАР к синтезу регуляторов с нелинейными моделями сложных электромеханических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мотор–колеса Michelin модель «Active Wheel» [Электронный ресурс] // Альтернативная энергия. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: URL: http://sww–energy.ru/elektrotransport/38–motor–kolesa–michelin–model–active–wheel.html (дата доступа 25.07.2019).

2. King, D. Protean Electric shows off production–ready in–wheel electric–drive system [Electronic resource] / D. King // Autoblog. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: URL: https://www.autoblog.com/2013/04/17/protean–electric–production–ready–in–wheel–electric–drive/ (дата доступа 25.07.2019)

3. Yoney, D. SIM–Drive's latest wheel–motored prototype is a sporty coupe [Electronic resource] / D. Yoney // Autoblog. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: URL: https://www.autoblog.com/2014/04/02/sim–drives–latest–wheel–motored–prototype–is–a–sporty–coupe/ (дата доступа 25.07.2019).

4. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст] / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 297 с.

5. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1994. – 327 с.

6. Колесников, А.А. Синергетическая теория управления [Текст] / А.А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

7. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза [Текст] / А.А. Колесников. – 2-е изд. – М.: Либроком, 2012. – 240 с.

8. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ. – Ч. II. – 2000. – 559 с.

9. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем/ Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. – Ч. III. – 2000. – 656 с.

10. Смирнов, Г. А. Теория движения колесных машин: Учебн. для студентов машиностроит. спец. вузов. [Текст] / Г.А. Смирнов. – 2–е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

11. Карасев, А.В. Новые разработки от производителей колесных машин [Текст] / А. В. Карасев // Технология колесных и гусеничных машин. – 2013. – № 4(8). – С. 6-15.

12. 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.

13. Колесников, А.А. Методы АКАР и бэкстеппинг в задачах синтеза нелинейных систем управления [Текст] / А.А. Колесников, Ал.А. Колесников, А.А. Кузьменко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – №7. – С. 435-445.

14. Кузьменко, А.А. Синергетическое управление нелинейными техническими системами: интегральная адаптация высокого порядка [Текст] / А.А. Кузьменко // Сборник научных трудов VIII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». – 18-20 сентября 2017. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2017. – С. 50-60.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-102-108

Межаков Олег Геннадьевич

Южный федеральный университет

ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУНАПРАВЛЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ПЛАТФОРМ.

Аннотация. *В данной статье рассматривается синтез нелинейных регуляторов трехфазного двунаправленного преобразователя напряжения подвижных платформ. Синтезированный регулятор методом АКАР и нейросетевой регулятор учитывают динамику объекта управления и парируют возмущающие воздействия, без оперативной оценки, по средствам интегральной адаптации.*

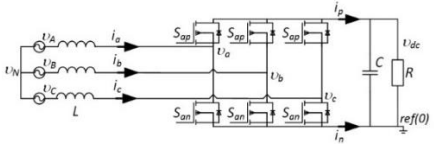
Ключевые слова: *трехфазный двунаправленный преобразователь напряжения, метод АКАР, интегральная адаптация, нейронная сеть, нелинейный регулятор*

Annotation. *This article discusses the synthesis of nonlinear regulators of three-phase bidirectional voltage converter of moving platforms. The synthesized regulator by the method of ACAR and the neural network regulator take into account the dynamics of the control object and counter disturbing influences, without prompt assessment, by means of integral adaptation.*

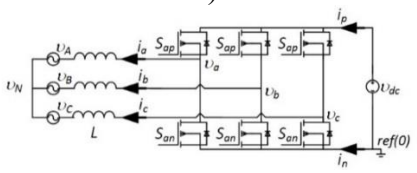
Keywords: *three-phase bidirectional voltage converter, AKAR method, integrated adaptation, neural network, nonlinear controller*

В чрезвычайных ситуациях (ЧС) необходимо организовать максимальное быструю доставку спасателей, оборудование. Обеспечить минимальное время перевозки пострадавших к месту оказания медицинской помощи. Выполнение данных мероприятий проходит с привлечением техники повышенной грузоподъемности и проходимости. Повышение качества стабилизации движения, в условиях сложного рельефа местности, возможно путем отказа от традиционных силовых установок в виде двигателя внутреннего сгорания и внедрением электропривода. Асинхронный электропривод (АЭ) поддерживает работу в двух режимах, развитие тяги и генерация энергии. Данные режимы возможны при наличии на борту двунаправленного трехфазного преобразователя напряжения (ДТФПН). Регулятор ДТФПН должен гарантировать стабилизацию заданных выходных параметров в недетерминированных условиях. Поэтому синтез нелинейного регулятора, учитывающего внешние не измеряемые воздействия, является лучшим решением.

Работа трехфазного двунаправленного преобразователя, электрическая схема которого представлена на рисунке 1, делится на два основных режима: трехфазный повышающий выпрямитель (ТПВ), трехфазный инвертор напряжения (ТИН)[1-3].



а)



б)

Рисунок 1 Электрические схемы: а) трехфазного повышающего преобразователя, б) трехфазного инвертора напряжения.

Составим математическую модель ТПВ, согласно рисунку 1 а). Усредненные значения тока i_φ и напряжения v_{dc} при условии их непрерывности и малых пульсаций выражается формулами:

$$v_\phi = d_\phi v_{dc} \quad (1)$$

$$i_p = d_\phi i_\phi \quad (2)$$

Применяя формулы (1,2) составим схему замещения одной фазы, рисунок 2.

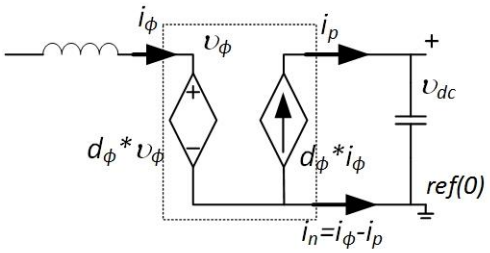


Рисунок 2 Схема замещения одной фазы

Схема замещения для ТПВ получается путем соединения трех схем замещений одной фазы, рисунок 3, где:

$$i_p = d_a i_a + d_b i_b + d_c i_c$$

$$i_n = i_a + i_b + i_c - i_p = i_z - i_p$$

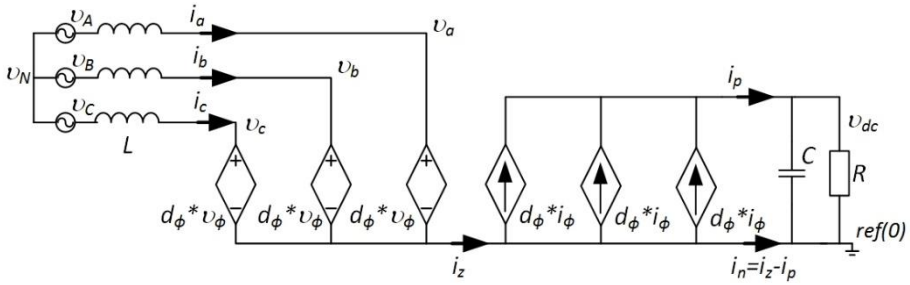


Рисунок 3 Схема замещения трехфазного повышающего преобразователя

Составим систему уравнений ТВП в пространстве состояний:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} + \frac{1}{L}\begin{bmatrix} v_N \\ v_N \\ v_N \end{bmatrix} - \frac{1}{L}\begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} v_{dc}$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}\begin{bmatrix} d_a & d_b & d_c \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{v_{dc}}{RC}$$

Где i_a, i_b, i_c – токи в соответствующей фазе; v_{AN}, v_{BN}, v_{CN} – фазные напряжения; v_N – напряжение источника; v_{dc} – выходное напряжение, d_a, d_b, d_c – рабочие циклы соответствующего силового ключа, R – сопротивление обмотки, C – емкость выходного конденсатора

В установившемся режиме стабилизация выходного напряжение v_{dc} достигается путем регулирования фазных токов i_a, i_b, i_c, которые должны быть в одной фазе с соответствующим фазным напряжением v_{AN}, v_{BN}, v_{CN}. Данные напряжения можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\omega t) \\ V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Выполним переход из стационарной координатной системы «abc» во вращательную «dqz». Матрицу преобразования выбираем следующую:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\omega t & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Где ω – частота линии переменного тока, T – ортогональная матрица

Преобразование системы координат производим по формуле:

$$X_{dqz} = T * X_{abc}$$

Произведя математические расчеты, учитывая, что ток $i_z \equiv 0$ тождественно равен нулю, так как физически нет такого пути протекания тока, система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} &= \frac{1}{L}\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L}\begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} v_{dc} \\ \frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{1}{C}\begin{bmatrix} d_d & d_q \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{v_{dc}}{RC} \end{aligned} \tag{3}$$

Синтез регулятора режима ТВП выполним методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления [4]. Данный метод в синтезе регулятора учитывает физические особенности управляемого объекта, и дает возможность парировать параметрические и внешние не измеряемые воздействия.

С целью парирование параметрических, возмущающих воздействий и сохранение заданных выходных параметров ТПВ применим метод интегральной адаптации [5-7] синергетической теории управления. Данный метод заключается в построении «гарантирующего регулятора», обеспечивающего компенсацию возмущений и реализовывает астатический закон управления. Целью стабилизации выберем v_{dc}, напряжение на аккумуляторной батареи (нагрузке). Каналами регулирующие величину выходного напряжения являются d_d и d_q. Введем три интегратора, расширяющие систему (3). Запишем итоговую систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{i}_d = \frac{v_d}{L} + \omega i_d - \frac{d_d v_{dc}}{L} - z_1$$

$$\dot{i}_q = \frac{v_q}{L} - \omega i_q - \frac{d_q v_{dc}}{L} - z_2$$

$$\dot{v}_{dc} = \frac{d_d i_d + d_q i_q}{C} - \frac{v_{dc}}{RC} - z_3$$

$$\dot{z}_1 = \eta_1 (i_d - z_3)$$

$$\dot{z}_2 = \eta_2 \left(i_q - i_{qyst} \right)$$

$$\dot{z}_3 = \eta_3 \left(v_{dc} - v_{yst} \right)$$

Где η_n – коэффициент определяющий динамику интегральной адаптации; i_{qyst} – задаваемый ток оси «q»; v_{yst} – требуемое напряжение.

Согласно методу АКАР вводим макропеременные:

$$\psi_1 = i_d - z_3 \quad (4)$$

$$\psi_2 = i_q - i_{qyst} \quad (5)$$

По условиям метода АКАР [4] макропеременные (4,5) должны удовлетворять решению $\psi_i = 0$ основного функционального уравнения (ОФУ):

$$T_i \dot{\psi}_i (t) + \psi_i = 0 \quad (6)$$

Подставляем макропеременные в (6), получим:

$$T_1 \left(\frac{v_d}{L} + \omega i_d - \frac{d_d v_{dc}}{L} - z_1 - \eta_3 \left(v_{dc} - v_{yst} \right) \right) + i_d - z_3 = 0 \quad (7)$$

$$T_2 \left(\frac{v_q}{L} - \omega i_q - \frac{d_q v_{dc}}{L} - z_2 \right) + i_q - i_{qyst} = 0 \quad (8)$$

Выразим из (7) и (8) законы управления для стабилизации напряжения:

$$d_d = \frac{T_1 v_d + T_1 \omega i_d L + i_d L - T_1 z_1 L - T_1 \eta_3 L v_{dc} + T_1 \eta_3 L v_{yst} - z_3 L}{T_1 v_{dc}}, \quad (9)$$

$$d_q = \frac{-T_2 v_q + T_2 \omega i_q L + T_2 z_2 L - i_q L + i_{qyst} L}{T_2 v_{dc}}. \quad (10)$$

В независимости от типа аккумуляторной батареи, устанавливаемой на подвижную платформу. Алгоритм заряда как свинцово-кислотных, так и литий-ионных аккумуляторов требует режима стабилизации тока [8]. Проведем синтез регулятора режима стабилизации тока ТПВ. Перепишем систему дифференциальных уравнений согласно новым требованиям:

$$\dot{i}_d = \frac{v_d}{L} + \omega i_d - \frac{d_d v_{dc}}{L} - z_4,$$

$$\dot{i}_q = \frac{v_q}{L} - \omega i_q - \frac{d_q v_{dc}}{L} - z_5,$$

$$\dot{v}_{dc} = \frac{d_d i_d + d_q i_q}{C} - \frac{I_{dc}}{C} - z_6,$$

$$\dot{z}_4 = \eta_4 \left(i_d - z_6 \right),$$

$$\dot{z}_5 = \eta_5 \left(i_q - i_{qyst} \right),$$

$$\dot{z}_6 = \eta_6 \left(I_{dc} - I_{yst} \right)$$

Введем макропеременные:

$$\psi_4 = i_d - z_6,$$

$$\psi_5 = i_q - i_{qyst}.$$

Подставляем макропеременные в ОФУ (6). Решая полученные уравнения, выразим законы управления рабочих циклов d_d и d_q для режима стабилизации тока:

$$d_d = \frac{T_4 v_d + T_4 \omega i_d L + i_d L - T_4 z_4 L - T_4 \eta_6 L I_{dc} + T_4 \eta_6 L I_{yst} - z_6 L}{T_4 v_{dc}}, \quad (11)$$

$$d_q = -\frac{-T_5 v_q + T_5 \omega i_q L + T_5 z_5 L - i_q L + i_{qyst} L}{T_5 v_{dc}}. \quad (12)$$

Проведем моделирование в среде «Matlab Simulink», рисунок 4, полученных законов управления (9,10). Установим напряжение на выходе равное +800В и изменяемую токовую нагрузку от 8А до 80А. Результаты моделирования режима стабилизации напряжения представлены на рисунке 5. Моделирование законов управления (11,12) представлены на рисунке 6. Как и ранее установим ограничение тока 80А с последующим «ступенчатом» изменении до 12,5 и до 50А.

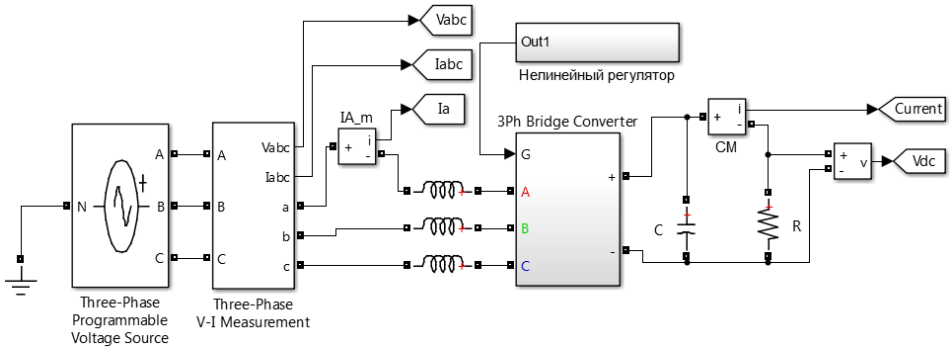


Рисунок 4 Схема в «Matlab Simulink» ТПВ

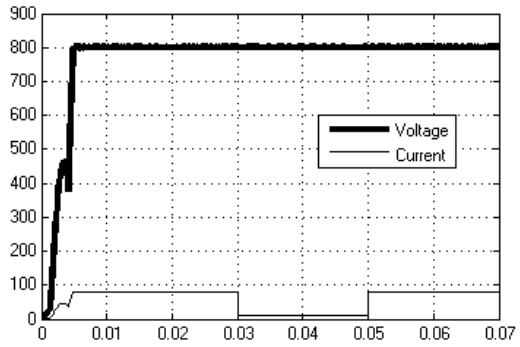


Рисунок 5 Моделирование режима стабилизации напряжения

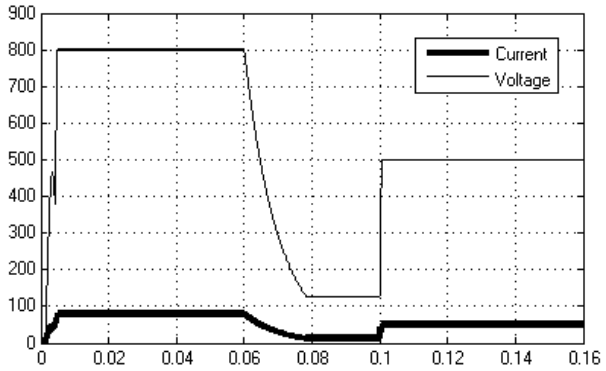


Рисунок 6 Моделирование режима стабилизации тока

Как видно из осциллограмм, синтезированные законы управления полностью справляются с поставленной задачей. Внешнее неопределенное воздействием, без оперативной оценки, парируется регуляторами. Амплитуда пульсаций выходного напряжения составляет 8%, амплитуда отклонения тока от заданного менее 5%.

В режиме тяги к регулятору АЭ предъявляется требование стабилизации заданной скорости вращения, которая рассчитывается регулятором верхнего уровня. В работах [9-13] рассматривается стабилизация скорости без предъявлений требований к ее форме переходной характеристики. Такой подход является не оптимальным для тяжелых платформ, где важно не только точность и качество стабилизации скорости, но график изменения скорости платформы во времени. Например, в условиях движения по мягкому грунту недопустимо резкое увеличение скорости в начале движения, это приводит к потере сцепления с поверхностью дороги. Очевидно, синтезируемый регулятор должен быть нелинейным и ДТФПН с АЭ должны рассматриваться как единый объект управления. Тогда частота выходного напряжения ДТФПН в режиме ТИН определяется ошибкой скоростью вращения АЭ. Самым оптимальным регулятором для данной задачи, позволяющим задавать нужную переходную характеристику, как показано в работе [14] является нейронная сеть.

Двигатель во время работы подвергается неопределенным возмущениям. Возникает вероятность к формированию неадекватного управляющего воздействия. С целью парирования внешних не измеряемых воздействий применим принцип интегральной адаптации из синергетической теории управления профессора А.А. Колесникова. Запишем уравнение интегральной адаптации первого порядка для скорости ротора:

$$\frac{Ierr}{dt} = 100\frac{k\left(Speed_{int} - Speed\right)}{Speed_{int}} + Ierr$$

Где $Speed_{int}$ – заданная скорость ротора; $Speed$ – текущая скорость ротора; $Ierr$ – интегральная адаптация; k – коэффициент определяющий динамику интегральной адаптации.

Программа обучения нейронной сети составляется на основе опыта управления объектом и желаемого переходного процесса. Функция переходного процесса описывается следующими уравнениями:

$$u\left(Ierr\right) = \begin{cases} \dfrac{3}{10}Ierr, npu\, 0 \le Ierr \le 3.2613 \\ -0.4885\tanh\left(\dfrac{1}{2}Ierr - 40\right) + 0.49, npu\, 3.2613 \le Ierr \le 84 \\ -0.4885\tanh\left(0.25Ierr - 20\right) + 0.49, npu\, 84 \le Ierr \le 100 \end{cases}$$

Где u – рабочий цикл ДТФПН в режиме ТИН;

Регулятор скорости вращения АЭ должен гарантировать устойчивость системы в целом, поэтому синтезируем нейронную сеть по принципу нейронной сети Хопфилда[15].

Проведем моделирование синтезированного закона управления, установив скорость ротора 50 рад/с. Моделируемая схема представлена на рисунке 7. Проверку качества стабилизации при внешнем возмущении, которое имитируется постоянно изменяющейся нагрузкой на АЭ от 0 до 200 Н*м, рисунок 8.

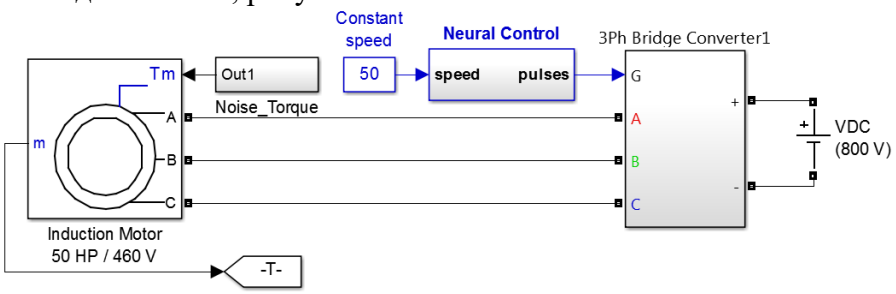
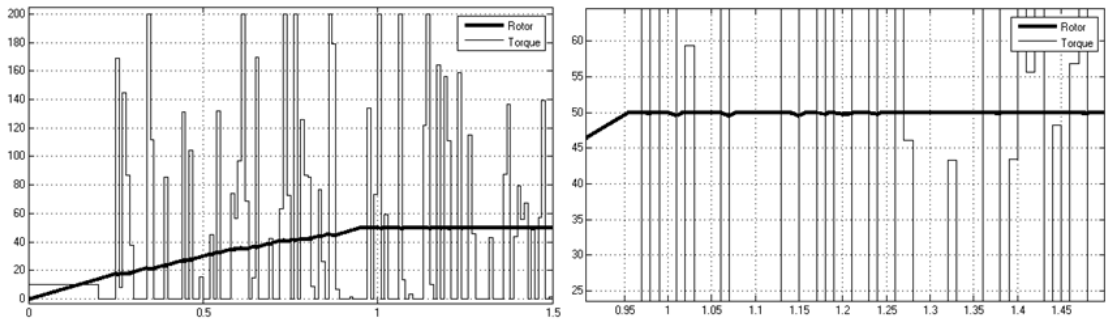


Рисунок 7 Схема моделирования ТИН



а) б)

Рисунок 8 Скорость ротора при постоянно действующем возмущении

По результатам моделирования можно заключить, что синтезированная нейронная сеть с интегральной адаптацией полностью справляется с хаотически меняющийся нагрузкой на валу двигателя амплитудой от 0 до 200 Н*м.

Таким образом, представленные нелинейные регуляторы трехфазного двунаправленного преобразователя для движущихся платформ работающих на аккумуляторных батареях

обеспечивают стабильность угловой скорости вращения АЭ или заряд аккумулятора. Данные регуляторы учитывают нелинейную динамику объекта управления и позволяют синтезировать заданные переходные характеристики. Такой подход выводит на новый качественный уровень систему управления электрических платформ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azrita Alias, Nasrudin Abd. Rahim, Mohd Azlan Hussain. Bidirectional Three Phase Power Converter, IEEE First Conference on Clean Energy and Technology CET, pp.337-341, 2011.

2. Weilun Warren Chen. BIDIRECTIONAL THREE-PHASE AC-DC POWER CONVERSION USING DC-DC CONVERTERS AND A THREE-PHASE UNFOLDER, UTAH STATE UNIVERSITY, Logan, Utah, p. 175, 2017.

3. David Menzi, Dominik Bortis and Johann W. Kolar. A New Bidirectional Three-Phase Phase-Modular Boost-Buck AC/DC Converter, IEEE, 2018.

4. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления. Ч. 2. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000, 558 с.

5. VIII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. 444с., стр.61

6. Межаков О.Г. Синергетический регулятор понижающего неизолированного импульсного источника питания. Известия ЮФУ №8 (181), август 2016.

7. Межаков О.Г. Синергетический метод управления гусеничной платформой. «Инженерный вестник Дона», №3, 2018.

8. В.Л. Хейфец, Д.К. Авдеев, Л.С. Рейшахрит. Практикум по теоретической электрохимии. Ленинград: Издательство ленинградского университета, 1954.

9. Vasiliy O. Nagorniy, Anatoliy V. Aristov. MATHEMATICAL SIMULATION OF THEASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF PERIODIC MOVEMENT, MATEC Web of Conferences 91, 01042, 2017.

10. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999, 66 с.

11. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика).

12. Maloth Purnalal, Sunil kumar T K. DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL AND SPEED CONTROL OF BLDC MOTOR, IJEEE, Volume 07, Issue 01, Jan- June 2015.

13. А.Н. Попов. Энергосберегающие регуляторы для систем автоматизированного электропривода. «Инженерный вестник Дона», №4 2016.

14. Фундаментальные исследования с применением компьютерных технологий в науке, производстве, социальных и экономических процессах**:** материалы 18-ой Национал. молод. науч. - практ. конф., г.Новочеркасск, 17-18 января 2019г. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск: Лик, 2019, стр 322.

15. Кутыркин А.В., Сёмин А.В. Использование нейронной сети Хопфилда для решения оптимизационных задач маршрутизации: Методические указания. Москва: МИИТ, 2007, 15с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-109-113

Подоплёкин Юрий Фёдорович, Шаров Сергей Николаевич

АО «Концерн «Гранит-Электрон»

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА МАЛОМЕРНЫЕ СУДА

Аннотация. *Рассматривается способ посадки беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на захватное устройство, выдвигающееся на кран-балке за борт судна. Показаны особенности управления посадкой в условиях нерегулярной качки судна. Определены условия, при которых возможно зацепление БПЛА захватным устройством – «сухая» посадка либо осуществить приводнение БПЛА - «мокрую» посадку. В работе предложен алгоритм поддержки принятия этого решения. Для его реализации навигационная система судна интегрируется с судовой системой посадки БПЛА.*

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, система управления БПЛА судового базирования.*

Введение

Использование БПЛА в таких сферах как дистанционное зондирование земли, контроль коммуникаций и границ, ретрансляция сигналов, экологический мониторинг снижает себестоимость услуг на порядок и даже больше по сравнению с традиционными космическими или авиационными системами. Прогрессу гражданских систем способствует миниатюризация и удешевление электронных компонентов бортового оборудования.

Сравнение БПЛА самолетного и вертолетного типов (тип двигателя, запас топлива, полезная нагрузка) показало ряд преимуществ БПЛА самолетного типа: больший радиус действия; большее время полета; лучшие аэродинамические показатели; больший коэффициент полезной нагрузки.

Однако БПЛА вертолетного типа имеют другое серьезное преимущество, заключающееся в их возможности совершать посадку на площадки ограниченных размеров, что не способны осуществить БПЛА самолетного типа. Возможность размещения и применения многоцелевых комплексов БПЛА на маломерных судах обеспечивается только тогда, когда решен вопрос обеспечения их безопасной посадки.

Сравнительный анализ способов посадки

Вследствие уникальных эксплуатационных и технических особенностей, с которыми сталкивается флот при применении БПЛА на судах гражданского назначения, не приспособленных для посадки летательных аппаратов, немаловажное значение имеет поиск разработчиком судна проектных решений, обеспечивающих возможность размещения требуемых средств посадки. Например, обеспечение взлетно-посадочной полосы (ВПП), на которую непосредственно осуществляется посадка с последующим пробегом и торможением. Однако решение этого вопроса в большинстве случаев связано с необходимостью значительного изменения внешней архитектуры судна (изменение положения надстроек, навигационного оборудования, средств погрузки и т.д.) с целью поиска необходимых площадей. Это не всегда является возможным и приемлемым для проектанта судна в связи с возможными существенными изменениями некоторых его эксплуатационных и технических характеристик.

Обширный перечень статей в иностранных журналах по проблемам посадки БПЛА приведен в библиографических ссылках работ [1-5] и насчитывает несколько десятков наименований, поэтому в настоящей статье не приводится. Анализ отечественных и иностранных публикаций свидетельствует о том, что наиболее трудной проблемой является

спасение «сухим» методом. При спуске БПЛА на парашюте и посадки на воду необходим восстановительный ремонт аппарата и значительные временные затраты для готовности его у повторному запуску, что связано со значительными расходами. В связи с этим отрабатываются различные методы посадки аппаратов на палубу судна (некоторые из них основаны на способах, разработанных для посадки БПЛА на сушу): посадка БПЛА в вертикальную сеть, с использованием крыла-парашюта и подхватом штангой, укрепленной на вертикальном шесте на борту судна, и др.

Использование БПЛА на судах и кораблях сдерживается единственной причиной, отсутствием надёжных средств их посадки. АО «Концерн «Гранит-Электрон» имеет большой практический опыт создания корабельной и бортовой аппаратуры управления БПЛА, а также существенный теоретический задел по способам «сухой» посадки БПЛА на кран-балку с захватным устройством в условиях качки судна. Достоинства способа посадки БПЛА на выдвигающуюся за борт судна кран-балку: оперативность «развёртывания» и «свёртывания», возможность использования для БПЛА различного типа, пригодность к размещению на судах любого класса, минимальное дополнительное оборудование на судне и БПЛА.

БПЛА судового базирования укомплектованы бортовой аппаратурой системы навигации и управления, связи и сменной целевой аппаратурой, чаще всего радиолокационной или оптико-электронной (телевизионной, тепловизионной или лазерной). Судовое оборудование включает в себя пульт управления, аппаратуру связи носителя с БПЛА, а также катапульту для пуска БПЛА и посадочное устройство.

В зависимости от координатора – устройства, определяющего рассогласование положения и направления движения БПЛА и судового посадочного устройства (точки прицеливания), возможны различные способы управления движением БПЛА для посадки [1].

– Автономное или автоматизированное управление БПЛА с бортовым координатором, самонаведение на зацеп устройства посадки.

– Автономное или автоматизированное управление БПЛА с судовым координатором, где сигналы управления, обеспечивающие приведение БПЛА к зацепу посадочного устройства, по каналу связи передаются на борт БПЛА.

– Возможно комбинированное управление с использованием информации бортового и судового координаторов, а также резервное ручное управление с визуальным наблюдением оператором движения БПЛА.

Основные задачи управления посадкой

Первой задачей для любого способа управления посадкой является оценка возможности возвращения БПЛА на судно-носитель при имеющемся запасе горючего на борту. Эта задача определения программной траектории движения с учётом текущих координат и параметров движения обоих объектов, обеспечивающей минимальный путь и необходимые направление и высоту полёта на конечном участке.

В общем случае траектория сближения состоит из 4-х характерных частей и определяются в зависимости от принятого критерия оптимальности и ограничений на параметры движения БПЛА и судна.

Задача оптимизации сводится к поиску минимального пути $L(A_0, A_1, A_2, A_3) \rightarrow min\ L_{\sum}$, т.к. длина участка L_{IV} принимается постоянной. Радиус манёвра БПЛА в горизонтальной плоскости ограничен допустимыми значениями боковой перегрузки и угла скольжения, а в вертикальной допустимыми значениями скорости снижения и угла атаки.

В вертикальной плоскости для исключения «просадки» при снижении БПЛА на высоту посадочного устройства необходим участок плавного изменения скорости снижения, например, по экспоненциальной траектории.

Возможно оптимизировать траекторию возврата БПЛА на носитель по критерию минимального времени возврата $T_{вз}$, $L(A_0, П_Т)/V_A \rightarrow min\ T_{вз}$.

Расчёт протяжённости траектории сближения L в реальном масштабе времени позволяет контролировать возможность возвращения БПЛА на судно-носитель посадочного устройства. Если оставшийся на борту запас горючего Q уменьшился до критической величины $Q_{КР}$, необходимой для возвращения на носитель, то необходимо начинать манёвр возвращения БПЛА. $Q_{КР}=L\ q_{уд}$, где $q_{уд}$ – расход топлива на единицу пути.

Если при возвращении на носитель не обеспечивается гарантированное сцепление БПЛА с посадочным устройством и необходимо иметь запас топлива для повторного захода на посадку, траектория сближения выбирается из условия минимального расхода топлива БПЛА при возврате на носитель. Критерий выбора траектории в этом случае $L(A_0,П_Т)\ q_{уд} \rightarrow minQ$, где $q_{уд}$ – экономичный расход топлива на единицу пути, определяющий оптимальную высоту и скорость возврата БПЛА.

Погрешность реализации программной траектории под действием случайных факторов внешней среды и внутренних помех в бортовой аппаратуре будет определять начальное рассогласование для системы приведения БПЛА к устройству зацепления на носителе.

Точное приведение БПЛА на посадочное устройство

В системах приведения БПЛА к посадочному устройству информация о движении цели воспринимается координатором цели, размещенным в носовой части БПЛА или на судне. На основе этой информации формируются управляющие сигналы, подаваемые в систему управления, которая обеспечивает движение аппарата по направлению к пеленгуемой цели.

На начальном этапе захода на посадку применяется инерциальное наведение на "математическую" цель с коррекцией положения БПЛА и скорости при маневре корабля-носителя, по информации, передаваемой по радиолинии. На конечном участке после захвата сигнала используется самонаведение на точку прицеливания посадочного устройства.

Автономная бортовая система БПЛА наводится на точку прицеливания, которая является центром допустимой области на кран-балке, где обеспечивается сцепление БПЛА с посадочным устройством. Если эта точка имеет контраст (например, подсвечена световым фонарём), то приведение к ней летательного аппарата аналогично самонаведению крылатой ракеты на контрастную цель. Особенности здесь следующие.

Указанная точка прицеливания не имеет контраста, так как разместить в ней излучатель или отражатель невозможно по конструктивным ограничениям (в эту точку попадает БПЛА в момент сцепления с посадочным устройством). По этой причине на кран-балке и судне необходимо установить сигнальные маяки (минимум 3 световых фонаря или светоотражателя) с известным геометрическим расположением относительно точки прицеливания. Здесь приведение БПЛА к точке прицеливания аналогично тому, как наводятся крылатые ракеты на неконтрастные цели, наблюдая расположенные вблизи цели контрастные ориентиры, или сравнивая наблюдаемое изображение кран-балки с его эталонным изображением по принципу корреляционно-экстремальных систем.

Динамика этих процессов с бортовым координатором (аналогично головкам самонаведения ракет) хорошо изучена в прошлом веке и описана, например, в работах АО «Концерн «Гранит-Электрон» [2-4]. Методический аппарат оценки промаха летательного аппарата под воздействием детерминированных и случайных факторов в настоящее время хорошо отработан.

Судовая система управления посадкой БПЛА

В состав навигационной системы судна входят измерители: вертикальных колебаний и горизонтальных смещений судна, текущего курса судна, крена и дифферента судна. Указанные измерители обеспечивают систему управления посадкой необходимой информацией о текущем положении судна.

В судовой системе управления посадкой БПЛА телевизионная камера и дальномер размещаются непосредственно на кран-балке посадочного устройства.

В условиях хорошей освещённости и контраста на экране монитора можно наблюдать силуэт БПЛА, а в плохих условиях – только пятно от светового фонаря, либо отражённый от световозвращателя сигнал лазерного локатора-дальномера. При использовании лазерного локатора, совмещённого с телевизионной приёмной системой, на экране монитора метка БПЛА формируется из пятна отражённого сигнала световозвращателя. Это пятно занимает несколько элементов разрешения, даже при отсутствии качки, в силу различных причин – расфокусировки, аберрации и вибраций. Угловые координаты БПЛА определяются по энергетическому центру пятна, как группы элементов разрешения приёмной системы ТВК, сигнал от которых превысил заданный порог обнаружения.

Главной особенностью судовых систем управления посадкой БПЛА является качка, поэтому исследование влияния качки с целью оценки возможности посадки БПЛА и поиск технических путей снижения её отрицательного влияния являются важной научной и практической задачей.

Смещения устройства посадки при качке

Важнейшим фактором, обуславливающим трудность посадки БПЛА на движущееся судно, является качка. Для компенсации влияния качки распространённым техническим средством является пространственная стабилизация захватного устройства, которая требует использования трёхзвенной системы приводов. В альтернативном варианте [1] предлагается жёстко закрепить захватное устройство на кран-балке, а стабилизировать его пространственное положение на экране монитора автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора таким образом, чтобы в неподвижной системе координат наблюдать рассогласование текущего местонахождения БПЛА и точки прицеливания на захватном устройстве.

В общем случае при качке колебания судна содержат составляющие по всем шести степеням свободы судна как твёрдого тела.

Захватное приспособление (точка прицеливания БПЛА) колеблется относительно своего статического (без качки и хода судна) положения в горизонтальной вертикальной и продольной плоскостях под действием качки судна. Особенностью здесь является существенно нелинейная зависимость смещения захватного устройства.

Если навигационная система судна обеспечивает в текущем времени измерение переменных параметров качки судна (значения амплитуды, частоты и фазы каждой из гармоник качки), а значения постоянных конструктивных параметров судна известны, то геометрические соотношения определяют смещение захватного устройства в вертикальной, горизонтальной и продольной плоскостях.

Для принятой гипотезы смещение захватного устройства в условиях регулярной качки определяется суммой гармонических составляющих.

При наличии на судне навигационного оборудования, позволяющего измерить параметры качки, смещение захватного устройства, определяется непосредственно по детерминированным кинематическим соотношениям.

При использовании акселерометров, ортогонально расположенных на кран-балке у захватного устройства, необходимо учитывать составляющие ускорения по каждой координате.

Задача существенно облегчается, если известны приближённые значения частот и максимально возможные амплитуды. Наибольшую неопределённость вносят априорно неизвестные значения соотношений колебаний качки.

Заключение

Основными проблемами посадки беспилотных летательных аппаратов на малоразмерные суда, требующие дальнейших исследований, являются следующие.

1. Способ посадки БПЛА на кран-балку имеет ряд преимуществ перед другими способами «мокрой» и «сухой» посадки. Однако методы количественной оценки этих преимуществ затрудняют признание приоритета этого способа перед другими.

2. Разработан метод расчёта оптимальных траекторий возврата БПЛА на судно-носитель и программной реализации алгоритмов управления для приведения БПЛА в зону захвата его судовой системой управления посадкой. Точность приведения БПЛА в зону обнаружения и сопровождения посадочного устройства бортовым координатором или обнаружения и сопровождения БПЛА судовым координатором определяется точностью навигационных систем БПЛА и судна, а также ветровыми возмущениями атмосферы. Методы её оценки известны из теории систем управления летательными аппаратами.

3. Методы точного приведения БПЛА к зацепу посадочного устройства во многом заимствованы от систем самонаведения ракет, теория которых разработана в прошлом веке. Указанные в работе отличия требуют дополнительных исследований как измерительных каналов координаторов, так и алгоритмов управления, особенно в условиях качки судна и возмущений атмосферы, вызванной движением судна.

4. Судовая система управления посадкой БПЛА на кран-балку требует точного навигационного обеспечения в части измерения угловых и линейных колебаний судна для определения смещения посадочного устройства и поля зрения телевизионного координатора. Эта информация позволит оператору наблюдать процесс приближения БПЛА и контролировать отклонения реальной траектории от траектории, требуемой для посадки БПЛА.

5. Для посадки БПЛА на судно в условиях качки целесообразно прогнозировать её текущие параметры и заранее определять положение посадочного устройства в момент сцепления с БПЛА. Наведение БПЛА в прогнозированное положение позволяет существенно повысить точность приведения БПЛА к зацепу посадочного устройства и расширить диапазон внешних условий, при которых обеспечивается надёжная посадка БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.А., Дворяшин М.С., Морозов В.В., Петухова Е.С., Подоплёкин Ю.Ф., Соловьев А.В., Соловьева В.В., Толмачев С.Г., Шаров С.Н., Яцковская И.М. Посадка беспилотных летательных аппаратов на суда: проблемы и решения / Под научной редакцией Коржавина Г.А. – СПб.: Судостроение, Библиотека судостроителя, Серия «Судовое приборостроение», 2014. –184 с.

2. Подоплёкин Ю.Ф., Шаров С.Н. Совместное управление движением судна и беспилотного летательного аппарата при посадке. // Информационно-управляющие системы, №6, 2014. – С. 26-44.

3. Соловьева В.В., Шаров С.Н. Судовые взлётные и посадочные устройства беспилотных летательных аппаратов. Морской вестник, 2015, № 1(53). – С. 45-69.

4. Толмачев С.Г., Шаров С.Н. Алгоритмы принятия решения для интегрированной системы посадки БПЛА на захватное устройство движущегося судна Сб. материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам под ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «Электроприбор», 2015. – С. 35-38.

5. Шаров С.Н. Информационные каналы систем управления беспилотных летательных аппаратов. Учебное пособие. – СПб.: Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова. 2018, 148 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-114-120

Чубукин Анатолий Владимирович, Целигоров Николай Александрович,
Целигорова Елена Николаевна

Донской государственный технический университет

СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Аннотация. *В статье рассматривается проблема создания цифровой системы регулирования асинхронного двигателя, которая содержит для увеличения диапазона изменения скорости датчик и регулятор скорости. Некоторые параметры динамической скалярной модели асинхронного двигателя могут изменяться в определенном диапазоне, что может привести либо к существенному ухудшению качества переходного процесса, либо, в крайнем случае, к потере устойчивости. Для устранения указанных недостатков предлагается осуществить синтез регулятора скорости, обеспечивающего робастную абсолютную устойчивость системы на основе применения графического метода построения видоизмененной амплитудно-фазовой характеристики.*

Ключевые слова*: цифровая система управления, робастная устойчивость, асинхронный двигатель, полином с интервальными коэффициентами*

Annotation. *The article deals with the problem of creating a digital system for controlling an asynchronous motor, which contains a sensor and a speed controller for increasing the speed range. Some parameters of the dynamic scalar model of an asynchronous motor can vary in a certain range, which can lead either to a significant deterioration in the quality of the transition process, or, in extreme cases, to a loss of stability. To eliminate these drawbacks, it is proposed to carry out a synthesis of the speed controller, which ensures the robust absolute stability of the system based on the use of a graphical method of constructing a modified amplitude-phase characteristic.*

Keywords: *digital control system, robust stability, asynchronous motor, polynomial with interval coefficients*

Введение

Современный частотно-регулируемый электропривод широкого применения состоит из асинхронного короткозамкнутого электродвигателя и статического преобразователя частоты (СПЧ) со звеном постоянного тока. Преобразователь частоты из постоянного напряжения звена постоянного тока формирует напряжение, переменное по частоте и амплитуде. Изменение частоты напряжения и его амплитуды приводит к изменению частоты вращения магнитного поля статора и, каксследствие, к изменению скорости вращения вала электродвигателя. В настоящее время известны следующие законы частотного управления асинхронным короткозамкнутым двигателем:

1. Скалярное управление.
2. Векторное управление (FOC).
3. Прямое управление моментом (DTC).

Обычно современные преобразователи частоты дают возможность реализовать несколько законов управления электродвигателем, для этого в них заложено программное переключение известных законов. Несмотря на успехи в области создания высоко динамичных электроприводов на основе векторного управления (FOC) и прямого управления моментом (DTC), скалярные системы управления не утратили своего значения, благодаря простоте реализации и настройки [1]. Скалярные системы управления не требуют определения точных

параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Схема скалярного управления основана, как правило, на согласованном регулировании частоты и напряжения на обмотке статора.

Для скалярных систем управления с целью расширения диапазона регулирования применяют датчик скорости. Ряд фирм выпускают асинхронные электродвигатели специально для работы от преобразователя частоты, в которые встраивают датчик скорости вала двигателя на этапе заводского изготовления. Эти встраиваемые в корпус двигателя датчики частоты вращения (инкрементальные энкодеры) имеют разрешение не менее 1024 метки на оборот.

Постановка задачи

Динамическая скалярная модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя строится на основе схемы замещения цепи фазы статора [2]. В этих условиях получение точной модели затруднительно, а использование векторной модели двигателя осложняется ее нелинейностью и наличием перекрестных обратных связей. На рис.1 приведена структурная динамическая схема скалярной системы с обратной связью по скорости двигателя.

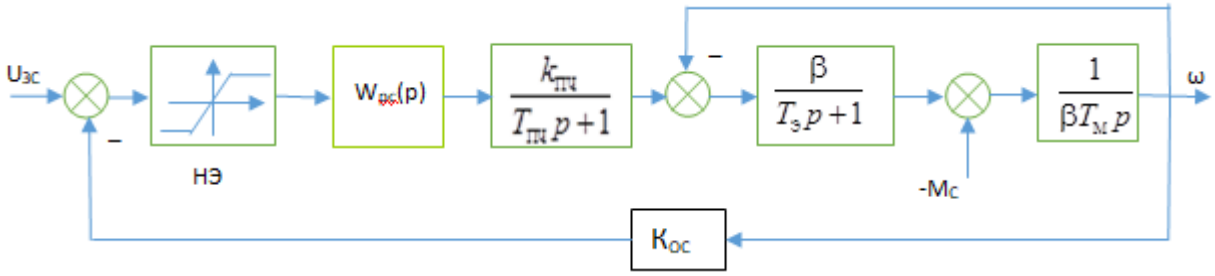


Рис. 1. Структурная схема скалярной системы электроприводас обратной связью по скорости

Структурная схема асинхронного двигателя является линеаризованной на участке механической характеристики в пределах относительного скольжения от нуля до критического значения. На схеме приняты следующие обозначения:

β – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики АД;

$T_Э$ – эквивалентная электромагнитная постоянная времени цепей ротора и статора асинхронного двигателя;

$k_{ПЧ}$ – передаточный коэффициент преобразователя частоты ПЧ;

$T_{ПЧ}$ – постоянная времени цепи управления ПЧ;

$T_M = \frac{J}{\beta}$ – электромеханическая постоянная времени асинхронного привода;

$W_{РС}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости;

$k_{ОС}$ – коэффициент передачи датчика обратной связи по скорости.

Исследования показали, что параметры динамической модели могут изменяться в достаточно широких пределах [3]. Приведенный вариант структурной схемы удобен для физического обоснования явлений при частотном регулировании асинхронного двигателя, но мало пригоден для практического использования при синтезе систем автоматического управления по причинам того, что электромеханическая и электромагнитная постоянные времени, а также коэффициент демпфирования являются функциями не только величины параметров схемы, но и режимов работы (скольжения) двигателя. Расчеты, проведенные в [4] показали, что электромеханическая и электромагнитная постоянные времени меняются в пределах ±20%. Синтез цифрового регулятора скорости двигателя с учетом сказанного должен быть выполнен на основе принципов робастного регулирования, чтобы обеспечивать устойчивый характер работы при возможных значениях постоянных времени [5]. Для этой цели проводится исследование системы управления путем построения амплитудно-фазовых характеристик в соответствии с условиями сильной теоремы Харитонова, применяя программный комплекс «Годограф Цыпкина» [6]. Непосредственно синтез цифрового регулятора целесообразно выполнить с помощью логарифмических псевдочастотных амплитудных и фазовых характеристик, используя переход к псевдочастоте на основе w-

преобразования. Используемая методика синтеза применяется, в основном, к одномерным системам управления и базируется на частотных представлениях и методах, Все основные положения изучены применительно к непрерывным системам, а затем распространены на дискретные системы. Это вносит единообразие в синтез непрерывных и дискретных систем, что позволяет их рассматривать с одинаковых позиций [4].

Решение задачи

Расчет параметров звеньев структурной схемы для скалярной САР скорости выполнен для асинхронного двигателя модели 4А100У3 4У3 со следующими номинальными параметрами: $P_Н$ = 4,0 кВт,$n_Н$ = 1431 об/мин,$S_Н$ = 0,046,$S_К$ = 0,315,$I_Н$= 8,6 А,$\eta_Н$ = 0,84, $M_К/M_Н$=2,4, $J_П = 0{,}15\,кг\cdot м^2$.

При номинальном режиме работы асинхронного двигателя электромагнитная постоянная времени равна $T_Э = 0{,}0101с,$ электромеханическая постоянная времени – $T_M = 0{,}0405с.$

Следовательно, передаточная функция двигателя (линеаризованная) по управлению равна

$$W_Д(p) = \frac{1}{T_M T_Э p^2 + T_M p + 1} = \frac{1}{0.00040905 p^2 + 0.0405 p + 1}. \quad (1)$$

Исходя из условия получения требуемой точности в установившемся режиме работы системы регулирования скорости, примем коэффициент передачи разомкнутой системы равным 40.

С учетом передаточной функции преобразователя частоты $W_П(p) = \frac{k_П}{T_П p + 1} = \frac{40}{0.005 p + 1}$

передаточная функция непрерывной части системы имеет вид

$$W_Н(p) = \frac{K_П}{T_П p + 1} \frac{1}{T_M T_Э p^2 + T_M p + 1} = \frac{40}{2{,}015 \cdot 10^{-6} p^3 + 0{,}0006115 p^2 + 0.0455 p + 1}. \quad (2)$$

Выполним синтез системы регулирования скорости АД с частотным управлением в дискретной цифровой форме, используя программную среду MatLaB. Преобразуем передаточную функцию непрерывной части системы в дискретную форму с учетом наличия экстраполятора нулевого порядка и с периодом дискретности 0,01с. В результате получим дискретную передаточную функцию непрерывной системы с соответствующими коэффициентами числителя и знаменателя

$$W(z) = \frac{1{,}626 z^2 + 3{,}266 z + 0{,}3677}{z^3 - 1{,}355 z^2 + 0{,}5366 z - 0{,}05028}. \quad (3)$$

С целью упрощения дальнейших расчетов разложим числитель и знаменатель (3) на произведения элементарных полиномов по нулям и полюсам передаточной функции

$$W(z) = \frac{1{,}6263(z + 1{,}889)(z + 0{,}1197)}{(z\text{-}0{,}6247)(z\text{-}0{,}5947)(z\text{-}0{,}1353)}$$

Как видно дискретная передаточная функция содержит нуль, величина которого больше единицы. Так как дальнейший синтез дискретного регулятора скорости будем выполнять с помощью псевдочастотных логарифмических характеристик, то подвергнем дискретную передаточную функцию (4) непрерывной части системы w-преобразованию с помощью подстановки $z = \frac{1 + w}{1 - w}$.

После выполним соответствующих вычислений получим следующую передаточную функцию

$$W_Н(w) = \frac{40(1\text{-}0{,}3097w)(1+0{,}7862w)(1\text{-}w)}{(1+4{,}32907w)(1+3{,}934w)(1+1{,}313w)}. \quad (5)$$

По материалам [3] были определены пределы изменения в зависимости от режимов работы двигателя электромагнитной и электромеханической постоянных времени, а также коэффициента передачи системы. В результате расчетовполучена передаточная функция непрерывной части системы с интервальными коэффициентами:

$$W(p)=\frac{32...48}{(1.5...2.41)10^{-6}p^3+(0.0052...0.0079)p^2+(0.0367...0.0516)p+(0.8...1.23)}. \quad (6)$$

Выполнив для предельных значений коэффициентов z-преобразование w-преобразование, получим передаточную функцию с интервальными коэффициентами:

$$W_H(w)=\frac{(0,199..0,255)w^3-(0,554..0.592)w^2-(0,0218..0,0275)w+(0,556..0,595)}{(3,354..3,924)w^3+(3,479..3406)w^2+(0,076..0,645)w+(0,08..0,52)}. \quad (7)$$

Проведем исследование (7) предложенным в [5] графическим методом.

На рис 2. представлена полученная совокупность видоизмененных амплитудно-фазовых характеристик для семейства передаточных функций (7).

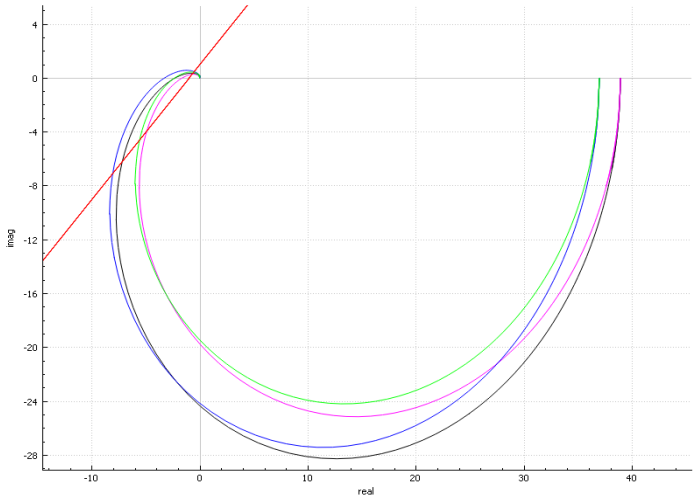


Рис. 2. Графическое отображение кривых Попова

Из рис. 2. видно, что исследуемая система не является робастно абсолютной устойчивой, так как видоизмененные амплитудно-фазовые характеристики пересекают прямую Попова. Для обеспечения робастной абсолютной устойчивости необходимо ввести в контур последовательное корректирующее устройство.

Перейдем к псевдочастотной характеристике непрерывной части системы путем умножения wна $T/2$=0,005 с, где T- период дискретности цифровой системы. В результате выполнения необходимых вычислений получаем псевдочастотную передаточную функцию

$$W_H(\lambda)=\frac{40(1-0,0,001548\lambda)(1-0,005\lambda)(1+0,00393\lambda)}{(1+0,02164\lambda)(1+0,01967\lambda)(1+0,006556\lambda)}. \quad (8)$$

По этой передаточной функции можно построить логарифмические псевдочастотные амплитудную и фазовую характеристики для непрерывной части цифровой системы. Как известно, основной задачей динамического синтеза регулятора является построение логарифмических характеристик желаемой системы, вид и параметры которых определяют свойства проектируемой системы. При построении логарифмической амплитудной характеристики (ЛАХ) следует учесть наличие неминимально-фазовых звеньев в псевдочастотной функции (8). Для придания проектируемой системы свойства грубости и, следовательно, робастности необходимо эти звенья включить в желаемую ЛАХ системы [4]. Кроме того, для достижения робастности системы необходимо обеспечить большие запасы по модулю и фазе (порядка 15дБ и 60 градусов). Удовлетворяющая перечисленным условиям желаемая ЛАХ системы имеет следующий вид:

$$W_{Ж}(\lambda)=\frac{40(1-0{,}0{,}001548\lambda)(1-0{,}005\lambda)}{(1+0{,}02164\lambda)(1+0{,}01967\lambda)}. \quad (9)$$

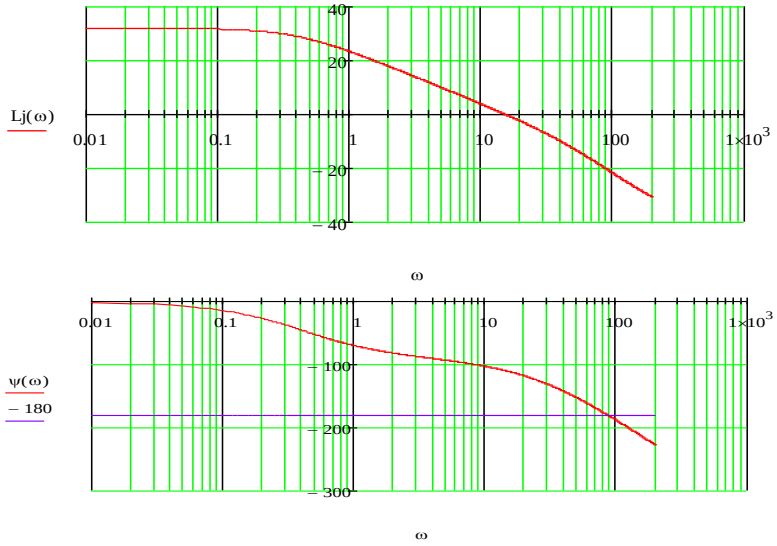


Рис.3. Логарифмические псевдочастотные амплитудная и фазовая характеристики желаемой системы

После построения логарифмических амплитудно-псевдочастотных характеристик желаемой (рис. 3) и непрерывной части систем находим, с учетом получения максимальных запасов по модулю и фазе, псевдочастотную логарифмическую характеристику последовательного корректирующего звена в виде

$$W_{P}(\lambda)=\frac{(1+0{,}02164\lambda)(1+0{,}0065\lambda)}{(1+2{,}512\lambda)(1+0{,}00393\lambda)}. \quad (10)$$

Определим w- характеристику, а затем дискретную передаточную функцию регулятора

$$W_{P}(w)=\frac{(1+4{,}328w)(1+1{,}3w)}{(1+502{,}4w)(1+0{,}786w)}. \quad (11)$$

$$W_{P}(z)=\frac{0{,}01363(z-0{,}6246)(z-0{,}13043)}{(z-0{,}996)(z+0{,}1192)}.$$

Определим w-изображение дискретной передаточной функции разомкнутой системы $W_{раз}(z)$ с интервальными коэффициентами, воспользовавшись выражением $W_{РАЗ}(w)=W_{Р}(w)W_{Н}(w)$. Для получения интервальных коэффициентов будем использовать раннее полученное выражение (7)

$$W_{РАЗ}(w)=\frac{(0{,}1431..0{,}1121)w^5-(3{,}912..3{,}005)w^4-(3{,}465..3.221)w^3}{(1546{,}9..1321{,}63)w^5+(3574{,}15..3058{,}57)w^4+(2076{,}7..2008{,}37)w^3}$$
$$\frac{+(2{,}598..2{,}4518)w^2+(3{,}3194..3{,}1078)w+(0{,}5947..0{,}556)}{+(533{,}4..162{,}743)w^2+(262{,}35..16{,}2466)w+(0{,}5201..0.0586)} \quad (12)$$

Проведем исследование полученной передаточной функции разомкнутой системы графическим методом, результаты которого представлены на рис. 4. Из приведенного рисунка видим, что синтезированный регулятор позволил обеспечить робастную абсолютную устойчивость исследуемой системы.

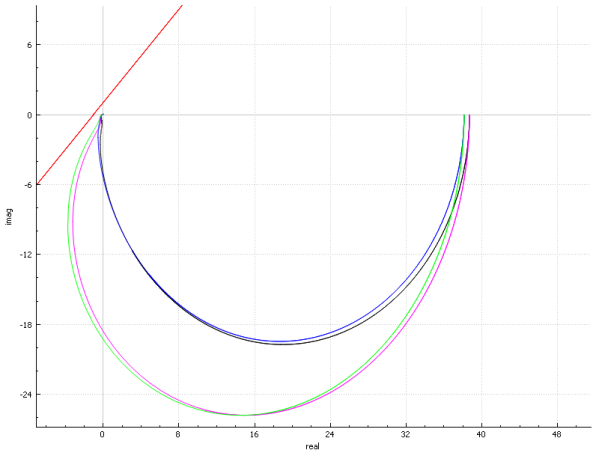


Рис.4. Графическое отображение модифицированных амплитудно-фазовых характеристик скорректированной системы

Для проверки правильности полученных результатов синтеза цифрового регулятора в программе визуального моделирования Simulink были составлены дискретная и дискретно-непрерывная структурные модели системы(рис.5).

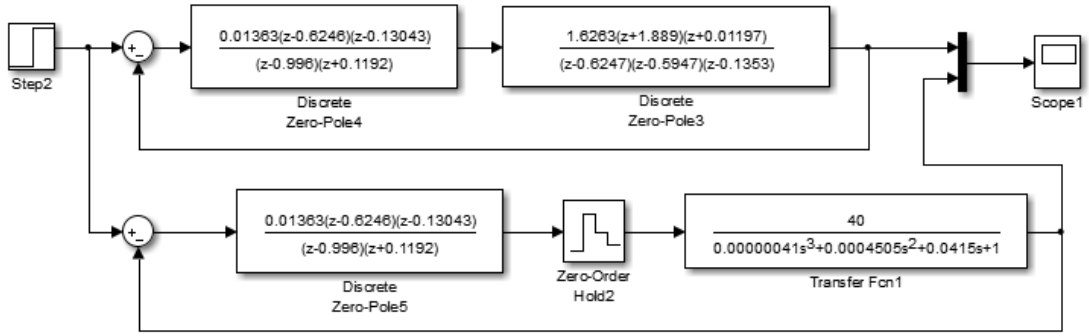


Рис.5. Структурные схемы дискретной и непрерывно-дискретной моделей системы

Графики переходных процессов в дискретной и непрерывно-дискретной моделях представлены на рис.6.

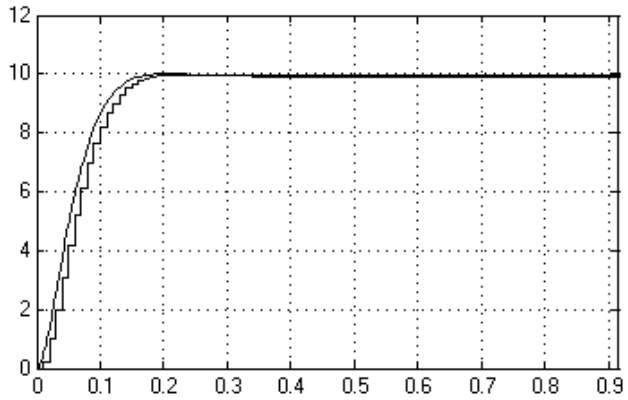


Рис.6. Переходные процессы в дискретной и непрерывно-дискретной моделях

Исследование динамических свойств этих моделей показало соответствие их заданным показателям качества и идентичность.

Заключение

Предложенный подход к синтезу последовательного корректирующего устройства на основе построения видоизмененных амплитудно-фазовых характеристик позволил в

исследуемой системе, имеющей разбросы значений электромеханической и электромагнитной постоянных времени, обеспечить робастную абсолютную устойчивость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студ. высш. учеб. заведений/ Г.Г. Соколовский – М.: Издательский центр «Академия», 2006, с.25.

2. Терехов В.М. Системы управления электроприводов. : Учебник для студ. высш. учеб. заведений/ В.М. Терехов, О.И. Осипов Под ред. В.М. Терехова– М.: Издательский центр «Академия» , 2005, с. 189.

3. 3.Каспржак Г.И. Автоматизированный асинхронный электропривод с частотным регулированием скорости общего применения. – М.: ВЗПИ, 1972, с. 6-8.

4. 4.Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М.,1976, с.25-119.

5. Tseligorov, N.A. The application of a graphical technique to determine the robust stability of a Nonlinear Impulsive Control System/ N.A. Tseligorov, G.M. Mafura, S.S. Maluytin// КОМОД 2015: труды международной конференции. 1-3 июля 2015 года. – СПб:, Изд-во Политехн. ун-та, 2015. с. 52-55.

6. Tseligorov, N.A. Robust absolute stability analysis of a temperature control system for an enclosed space / N.A. Tseligorov, G.M. Mafura, E.N. Tseligorova //International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), – Novosibirsk, Akademgorodok, Russia, 18-22 Sep., 2017. pp.356 – 359.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-121-128

Брикова Ольга Игоревна, Грудяева Елизавета Камаловна,
Душин Сергей Евгеньевич

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ В ОДНОЗОННОМ РЕАКТОРЕ

Аннотация. *Предложена модификация нелинейной математической модели биологической очистки сточных вод активным илом, построенная на основе модели ASM1, для которой в качестве влияющего внешнего фактора рассматривается температура внешней среды. Выполнен анализ поведения модели ASM1 в условиях действия внешней среды, получены семейства графиков переходных процессов концентраций субстрата и ила при различных температурных режимах. Определены наилучшие температурные режимы. Результаты моделирования подтверждают чувствительность поведения системы к изменению температуры окружающей среды.*

Ключевые слова: *биологическая очистка, сточные воды, активный ил, модель ASM1, температура.*

Annotation. *A modification of the nonlinear mathematical model of biological wastewater treatment with activated sludge, based on the ASM1 model, for which the external temperature is considered as an influencing external factor, is proposed. The analysis of the behavior of the ASM1 model under the conditions of the external environment is carried out; families of graphs of transition processes of substrate and sludge concentrations under various temperature conditions are obtained. The best temperature conditions are determined. The simulation results confirm the sensitivity of the system behavior to changes in the ambient temperature.*

Keywords: *biological treatment, wastewater, activated sludge, ASM1 model, temperature.*

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. Одной из самых известных и распространенных моделей биологической очистки является модель, предложенная Могенсом Хенце в 1987 г., названная ASM1 (activated sludge model №1) [6]. В основу данной модели положены хорошо известные и изученные базовые модели Герберта и Моно [7]. Модель ASM1 описывает процессы нитрификации и денитрификации и их взаимное влияние на процесс очистки в однозонном биореакторе [8]. Однако данная модель не учитывает влияния температуры внешней среды на процессы биологической очистки. Температура окружающей среды, в свою очередь, является важным технологическим фактором, который может быть использован в качестве управляющего воздействия.

Влияние температуры скорость роста микроорганизмов

Скорость роста микроорганизмов описывается уравнением Моно [1, 9, 10]:

$$\mu = \mu_m C / \left(C + K_c\right), \qquad (1)$$

где C_c — концентрация субстрата; K_c — константа полунасыщения; μ_m —максимальная удельная скорость роста.

Как показали исследования [2–4, 11], зависимость скорости роста биологического процесса μ_m от температуры θ описывается уравнением Вант-Гоффа:

$$\mu_m(\theta) = \mu_{\max}^{20°C} \exp^{\gamma(\theta-20°C)}, \quad (2)$$

где $\mu_{\max}^{20°C}$ — максимальная удельная скорость роста биомассы ила при температуре $20^\circ C$; γ — температурный коэффициент.

Исследование влияния температурного фактора в модели ASM1

Модель ASM1 описывает одну зону биореактора без разделения на кислородную и бескислородную зоны.

Схема взаимодействия процессов и компонентов в модели ASM1 приведена на рисунке 1 в виде концептуальной схемы [7].

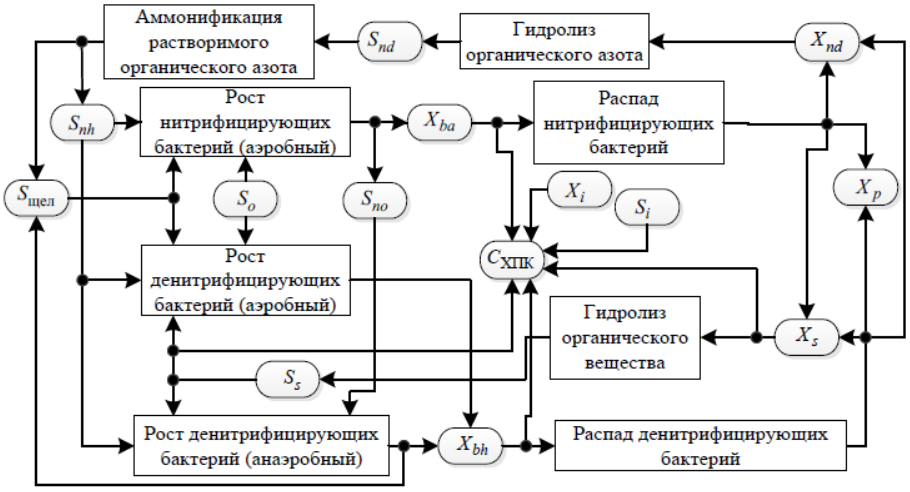


Рисунок 3.1 – Концептуальная схема ASM1

Процессы представлены в прямоугольниках. Концентрации реагентов указаны внутри круга. Концентрации реагентов связывают процессы. Стрелка, проходящая от процесса к концентрации реагента, указывает на увеличение данной концентрации. Стрелка, направленная от концентрации реагента к процессу, соответствует снижению этой концентрации. S – это символ, обозначающий концентрацию растворимых веществ, X – взвешенных.

Математическая модель ASM1, с учетом влияния температуры внешней среды описывается следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
&\frac{dX_{ba}}{dt} = \frac{X_{ba}^{вх} - X_{ba}}{T} + r_{ba}; \frac{dX_{bh}}{dt} = \frac{X_{bh}^{вх} - X_{bh}}{T} + r_{bh}; \frac{dS_{nh}}{dt} = \frac{S_{nh}^{вх} - S_{nh}}{T} + r_{nh};\\
&\frac{dS_{no}}{dt} = \frac{S_{no}^{вх} - S_{no}}{T} + r_{no}; \frac{dS_s}{dt} = \frac{S_s^{вх} - S_s}{T} + r_{ss}; \frac{dX_p}{dt} = \frac{X_p^{вх} - X_p}{T} + r_p;\\
&\frac{dX_s}{dt} = \frac{X_s^{вх} - X_s}{T} + r_{xs}; \frac{dS_o}{dt} = \frac{S_o^{вх} - S_o}{T} + r_o; \frac{dS_{nd}}{dt} = \frac{S_{nd}^{вх} - S_{nd}}{T} + r_{snd};\\
&\frac{dX_{nd}}{dt} = \frac{X_{nd}^{вх} - X_{nd}}{T} + r_{xnd}; \frac{dS_{alk}}{dt} = \frac{S_{alk}^{вх} - S_{alk}}{T} + r_{alk}.
\end{aligned} \quad (3)$$

где скорости изменения принятых концентраций записываются следующим образом:

$$r_{snd} = (k_h \frac{X_s / X_{bh}}{K_x + X_s / X_{bh}} (\frac{S_o}{S_o + K_{oa}} + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) - k_a S_{nd}) \mathrm{X}_{bh};$$

$$r_{nh} = -i_{xb} \exp^{\gamma(\theta-20)} ((\mu_{bh}^{20°\mathrm{C}} \frac{S_s}{S_s + K_s})(\frac{S_o}{S_o + K_{oh}} + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) \mathrm{X}_{bh} - (\frac{1}{Y_a} + i_{xb}) \times$$

$$(\mu_{ma}^{20°\mathrm{C}} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} \mathrm{X}_{ba})) + k_a S_{nd} X_{bh};$$

$$r_{xnd} = (i_{xb} - \mathrm{f}_p i_{xb})(\mathrm{b}_h X_{bh} + \mathrm{b}_a X_{ba}) - k_h \frac{X_s}{K_x + X_s} (\frac{S_o}{S_o + K_{oa}} + \eta_h \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}});$$

$$r_{bh} = (((\mu_{bh}^{20°\mathrm{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)}) \frac{S_s}{S_s + K_s})(\frac{S_o}{S_o + K_{oh}} + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) - b_a) \mathrm{X}_{bh};$$

$$r_{ba} = ((\mu_{ma}^{20°\mathrm{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)}) \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} - b_a) \mathrm{X}_{ba};$$

$$r_{ss} = -\frac{1}{Y_a} ((\mu_{bh}^{20°\mathrm{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)}) \frac{S_s}{S_s + K_s})(\frac{S_o}{S_o + K_{oh}} + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) \mathrm{X}_{bh} k_h \times$$

$$\times \frac{X_s}{K_x + X_s} (\frac{S_o}{S_o + K_{oa}} + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}});$$

$$r_{no} = \exp^{\gamma(\theta-20)} (-\frac{1 - Y_h}{2,86 Y_h} (\mu_{bh}^{20°\mathrm{C}} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) \mathrm{X}_{bh} \frac{\mu_{ma}^{20°\mathrm{C}}}{Y_a} \times$$

$$\times \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} \mathrm{X}_{ba});$$

$$r_o = \exp^{\gamma(\theta-20)} (\frac{1 - Y_h}{Y_h} \mu_{bh}^{20°\mathrm{C}} \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{S_o}{S_o + K_{oh}} X_{bh} - \frac{4,57 - Y_a}{Y_a} \mu_{ma}^{20°\mathrm{C}} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} \mathrm{X}_{ba});$$

$$r_{alk} = \exp^{\gamma(\theta-20)} ((\frac{1 - Y_h}{40,04 Y_h} - \frac{i_{xb}}{14}) \mu_{bh}^{20°\mathrm{C}} \mathrm{X}_{bh} (\eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} - \frac{i_{xb}}{14} \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{S_o}{S_o + K_{oh}}) -$$

$$-(\frac{i_{xb}}{14} + \frac{1}{7 Y_a}) \mu_{ma}^{20°\mathrm{C}} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} \mathrm{X}_{ba}) + \frac{1}{14} k_a S_{nd} \mathrm{X}_{bh};$$

$$r_p = \mathrm{f}_p (\mathrm{b}_h X_{bh} - \mathrm{b}_a X_{ba});$$

$$r_{xs} = (1 - \mathrm{f}_p)(\mathrm{b}_h X_{bh} + \mathrm{b}_a X_{ba}) - k_h \frac{X_s / X_{bh}}{K_x + X_s / X_{bh}} (\frac{S_o}{S_o + K_{oh}} + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) \mathrm{X}_{bh}.$$

В табл. 1 указаны все основные наименования параметров, их обозначения и единицы измерения. Моделирование выполняется в среде MATLAB/Simulink при различных температурных режимах, приведенных в табл. 2, и $Q^{вх}$, где $Q^{вх}$ - исходный расход сточных вод, м^3/сут. На рис. 2 представлены результаты моделирования при воздействии краткосрочных режимов 1, 2, 3 и $Q^{вх} = 5$.

Таблица 1 – Наименования, обозначения и единицы измерения.

Наименование величин и параметров	Обоз.	Ед. измерения
Фракция биомассы, приводящая к дисперсным продуктам	f_p	-
Корректирующий фактор для гидролиза при аноксидных условиях	η_h	-

Константа полунасыщения для гидролиза разлагаемого субстрата	K_x1	-
Концентрация твердых продуктов распада биомассы	X_p	гХПКм$^{-3}$
Концентрация биомассы гетеротрофов (автотрофов)	X_{bh} (X_{ba})	
Константа полунасыщения по органическому субстрату при денитрификации	K_s	
Концентрация взвешенного органического разлагаемого вещества	X_s	
Концентрация растворенного биологически разлагаемого органического вещества	S_s	
Концентрация взвешенного инертного органического вещества	X_i	
Константа полунасыщения по нитрату при денитрификации	K_{no}	гNO$^-_3$м$^{-3}$
Концентрация нитратного азота	S_{no}	
Фракция азота в биомассе АИ	i_{xb}	гN$_{общ}$/ /(гХПК)
Фракция азота в биомассе активного ила	i_{xb}	
Фракция азота в массе продуктов распада	i_{xi}	
Константа насыщения по кислороду для гетеротрофов	K_{oh}	гO$_2$м$^{-3}$
Корректирующий фактор скорости роста гетеротрофов в аноксидных условиях	η_g	-
Максимальный коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных бактерий	Y_h	гХПК/ /гN
Максимальный коэффициент прироста биомассы нитрификаторов	Y_a	
Скорость аммонификации	k_a	NH$_4$/ /Nсут$^{-1}$
Температурный коэффициент	γ	-
Температура среды	θ	°C
Концентрация взвешенного органического разлагаемого азота	X_{nd}	гNм$^{-3}$
Концентрация растворенного органического азота	S_{nd}	
Концентрация аммонийного азота	S_{nh}	гNH$_4^+$м$^{-3}$
Константа насыщения по аммонию	K_{nh}	
Концентрация растворенного кислорода	S_o	гNO$_2$м$^{-3}$
Щелочность	S_{alk}	эквм$^{-3}$
Константа насыщения по кислороду для автотрофов	K_{oa}	гO$_2$м$^{-3}$
Максимальная удельная скорость роста гетеротрофов (автотрофов) при 20°C	$\mu_{bh}^{20°C}$ ($\mu_{ma}^{20°C}$)	сут$^{-1}$
Константа распада денитрификаторов	b_h	
Константа распада нитрификаторов	b_a	
Константа гидролиза	k_h	

Таблица 2 – Принятые температурные режимы

Температурный	Температурный	Описание температурного режима

режим	диапазон	
Режим 1	от 5°C до 20°C	Повышение температуры от низкого значения до нормального
Режим 2	от 5°C до 35°C	Повышение температуры от низкого значения до высокого
Режим 3	от 20°C до 35°C	Повышение температуры от нормального значения до высокого
Режим 4	от 20°C до 5°C	Снижение температуры с нормального значения до низкого
Режим 5	от 35°C до 5°C	Снижение температуры с высокого значения до низкого
Режим 6	от 35°C до 20°C	Снижение температуры с высокого значения до нормального
Примечание – изменение происходит в момент времени 10 сут.		

Изменение температуры с низкого ($\theta_{low} = 5°C$) и нормального ($\theta_{norm} = 20°C$) значений до высокого ($\theta_{high} = 35°C$), что соответствует режимам 2 и 3 позволяет концентрации бактерий нитри- и денитрификаторов вырасти и снизить концентрации аммония и нитратного азота в отличие от режима 1, в котором температура повышается от низкого ($\theta_{low} = 5°C$) до нормального ($\theta_{norm} = 20°C$).

Также увеличение температуры позволяет снизить время установления для бактерий

Также увеличение температуры позволяет снизить время установления для бактерий гетеротрофов и растворенного биологически разлагаемого органического вещества на 3 суток.

Наилучший уровень очистки наблюдается при снижении температуры от высокого значения ($\theta_{high} = 35°C$) до нормального ($\theta_{norm} = 20°C$), что соответствует режиму 6.

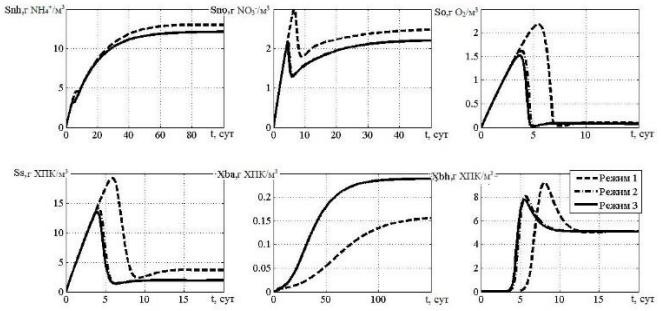


Рис. 1 – Графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 1, 2, 3 и $Q^{вх} = 5$.

На рис. 2 приведены графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 4, 5, 6 и $Q^{вх} = 5$.

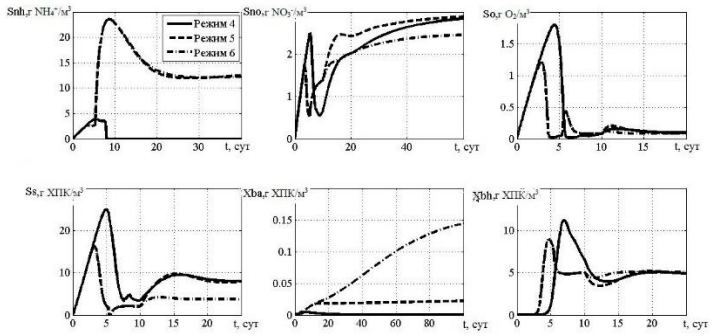


Рис. 2 - Графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 4, 5, 6 и $Q^{ex} = 5$.

Важно отметить резкий температурный перепад при снижении температуры от высокого значения ($\theta_{high} = 35°C$) до низкого значения ($\theta_{low} = 5°C$) не приводит к полному вымыванию культур, но значительно ухудшает качество биопроцессов. Данный результат объясняется высокой первоначально температурой, которая обеспечивает быстрый рост микроорганизмов и их хорошую способность к адаптации в изменившихся условиях среды.

На рис. 3 представлены графики изменения концентраций при воздействии краткосрочных режимов 1, 2, 3 и $Q^{ex} = 20$.

Увеличение температурного режима до высокого $(\theta_{high} = 35°C)$ и нормального $(\theta_{norm} = 20°C)$ значений, несмотря на низкую начальную температуру $(\theta_{low} = 5°C)$, позволяет создать благоприятные условия для развития микроорганизмов и снизить концентрации аммоний и нитратного азота. Важно отметить, что применения режимов 2 и 3 приводят к схожим результатам. Наихудший уровень очистки наблюдается при увеличении температуры от низкого ($\theta_{low} = 5°C$) до нормального ($\theta_{norm} = 20°C$).

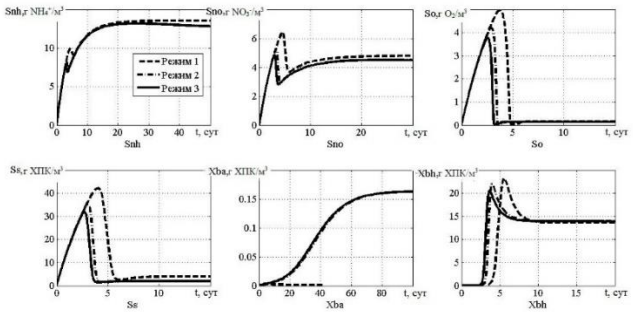


Рис. 3 - Графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 1, 2, 3 и $Q^{ex} = 20$.

На рис. 4 представлены графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 4, 5, 6 и $Q^{ex} = 20$.

При снижении температурного режимов наблюдается вымывание бактерий автотрофов. Снижение температуры от высокого ($\theta_{high} = 35°C$) значение до низкого ($\theta_{low} = 5°C$), что соответствует режиму 2, который характеризуется наибольшим температурным перепадом. Применение данного режима снижает максимальную концентрацию денитрификаторов, но обеспечивает лучше уровень очистки по сравнению с воздействием при котором температура

снижается с нормального ($\theta_{norm} = 20°C$) значения до низкого ($\theta_{low} = 5°C$), что соответствует режиму 4. Данный результат объясняется высокой первоначальной температурой. Наихудший уровень очистки наблюдается при использовании режима 4, наилучший – режим 6.

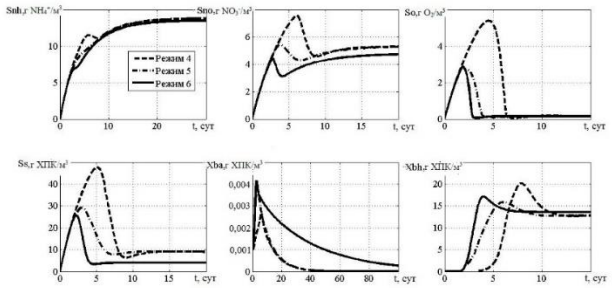


Рис. 4 - Графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 4, 5, 6 и $Q^{ex} = 20$.

Результаты компьютерного моделирования при воздействии температурных режимов 1, 2, 3 и $Q^{ex} = 435$ представлены на рис. 5.

Наилучший уровень очистки достигается при увеличении температуры от нормального ($\theta_{norm} = 20°C$) до высокого ($\theta_{high} = 35°C$) значения, что соответствует режиму 3. При данном воздействии наблюдается уменьшение времени установления переходных процессов на 5 суток, по сравнению с режимом 2, который характеризуется высоким температурным перепадом.

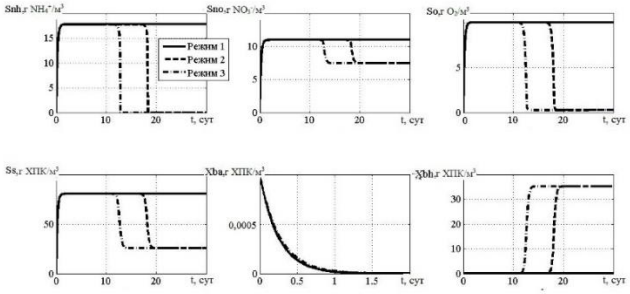


Рис. 5 - Графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 1, 2, 3 и $Q^{ex} = 435$.

Результаты компьютерного моделирования при воздействии температурных режимов 4, 5, 6 и $Q^{ex} = 435$ представлены на рис. 6.

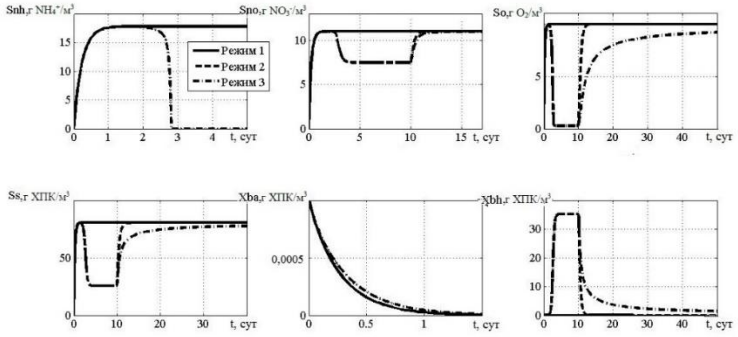


Рис. 6 - Графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 4, 5, 6 и $Q^{ex} = 435$.

Снижение температуры до $\theta_{low} = 5°C$ ухудшает качество очистки и уменьшает концентрацию микроорганизмов гетеротрофов. Наилучший уровень очистки наблюдается при снижении температуры с высокого значения ($\theta_{high} = 35°C$) до низкого ($\theta_{low} = 5°C$). Данный результат связан с высоким первоначальным значение, которое позволяет микроорганизмам вырасти и обеспечить необходимый уровень очистки до момента снижения температуры.

Заключение

Изменение температуры оказывает значительное влияние не только на популяцию микроорганизмов, но и на реакции их взаимодействия. Также важно отметить, что изменением температуры можно добиться более высокого качества очистки. Полученные результаты стоит учитывать при разработке системы управления температурой в биореакторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Monod J. Rechercher sur la croissance des cultures bacteriennes (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. Фролов. Ю.П., Розенберг Г.С. Управление биологическими системами. Надорганизменный уровень. Самара: Самарский университет, 2002. 191 с.
6. Henze, M. Activated Sludge Model No. 1 / M. Henze, C. P. L. Grady, W. Gujer, G. v. R. Marais, T. Matsuo. – London: IAWPRC, 1987.
7. 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.
8. Грудяева Е.К. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод/ Е.К. Грудяева, С. Е. Душин, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. – 231 с.
9. 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.
10. Яковлев, С. В., Карюхина Т. А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. Стройиздат, 1980. 200 с.
11. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур - М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-129-135

Романов Сергей Алексеевич

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОЙ ПРОВЕРКИ КРИТЕРИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ ДЛЯ КЛАССА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Аннотация. *В работе рассматривается алгоритм проверки слабой аттрактивности неустойчивого положения равновесия для класса нелинейных систем. Показано, что проверка условия соответствующего критерия может быть сведена к задаче разложения на сумму квадратов, то есть возможно её эффективное решения для систем небольшой размерности.*

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

Annotation. *This paper address nonlinear dynamic systems with Lyapunov unstable but weakly attractive equilibria. The numerical SOS-decomposition algorithm for checking existing criteria of forward invariance condition is proposed.*

Keywords: *weakly attracting set, Lyapunov functions, attractivity*

1. Введение

Одним из центральных понятий теории управления является устойчивость по Ляпунову. Требование устойчивости является практически обязательным при синтезе систем управления. Существуют, однако, системы, имеющие неустойчивые по Ляпунову, но в то же время слабо аттрактивные инвариантные множества. То есть существует множество ненулевой меры, из которого решения стремятся к слабо аттрактивному множеству. В качестве примера можно привести систему

$$\begin{cases} \dot{x} = -x + \lambda \\ \dot{\lambda} = -|x|^{1,5} \end{cases} \quad (1)$$

чей фазовый портрет представлен на рисунке 1. Черным цветом выделены траектории, образующие границу области притяжения, внутри которой все траектории стремятся к нулевому положению равновесия. В то же время оно является неустойчивым по Ляпунову.

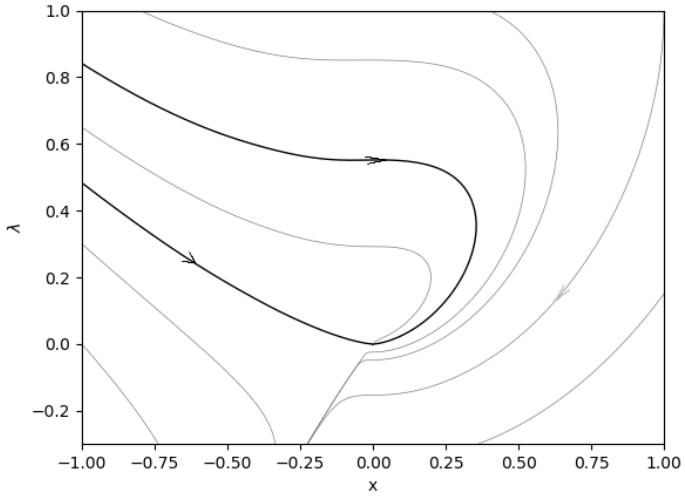


Рисунок 1 – фазовый портрет системы (1)

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. Для его проверки требуется найти функции из двух предположений и непосредственно из самого критерия, что может быть довольно затруднительно. В работе [2] это частично устраняется это препятствие, а именно приводится алгоритм поиска функции из критерия, полагая, что функции из предположений заданы. В работе [3] приводится упрощённый критерий положительной инвариантности, позволяющий находить такие функции из предположения, при которых условия критерия автоматически выполняются. К его недостаткам можно отнести некоторую консервативность, а также плохую приспособленность для оценки области притяжения.

Работа устроена следующим образом. Сначала приводится непосредственно критерий положительной инвариантности, затем алгоритм поиска функций критерия и упрощённый критерий положительной инвариантности. После этого приводится основной результат – алгоритм поиска функций из предположения в общем случае. Тем самым закрываются все случаи в применении критерия.

В работе используются обозначения, принятые в [1].

K_0 – множество неубывающих непрерывных функций $\kappa:\mathbb{R}_{\geq 0}\to\mathbb{R}_{\geq 0}$, таких что $\kappa(0)=0$, где $\mathbb{R}_{\geq a}=\{x\in\mathbb{R}\mid x\geq a\}$.

$\mathrm{K}\subset\mathrm{K}_0$ – подмножество строго возрастающих функций, $\mathrm{K}_\infty\subset\mathrm{K}$ подмножество функций с бесконечным пределом: $\lim\limits_{s\to\infty}\kappa(s)=\infty$.

$C^k([a,b])$ – пространство непрерывных функций одного аргумента, дифференцируемых по меньшей мере k раз на интервале $[a,b]$.

$\sum$ – множество всех разложимых на сумму квадратов полиномов.

Напомним теперь некоторые используемые определения.

Множество $\mathrm{S}\subset\mathrm{D}$ называют положительно инвариантным, если для всех $x_0\in\mathrm{S}$ и $t\in[0,\infty]$ решение $x(t;x_0)$ определено и $x(t,x_0)\in\mathrm{S}$.

Замкнутое положительно инвариантное множество $\mathrm{S}\subset\mathrm{D}$ называют слабо аттрактивным, если существует множество $\mathrm{V}\subset\mathrm{D}$ строго положительной меры, такое что для всех $x_0\in\mathrm{V}$ решение $x(t,x_0)$ определено на $[0,\infty)$ и $\lim\limits_{t\to\infty}\operatorname{dist}(\mathrm{S},x(t;x_0))=0$, где $\operatorname{dist}(\mathrm{S},x)=\inf\limits_{x'\in\mathrm{S}}\|x-x'\|$ – расстояние от точки x до множества S.

2. Критерий положительной инвариантности

Рассматривается система

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

где функции $f:\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}\to\mathbb{R}^n$, $g:\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}\to\mathbb{R}$ – непрерывные и локально липшицевы, точка $(x=0,\lambda=0)$ является положением равновесия. Поведение системы будем рассматривать в области $D_\Omega=D\times\Lambda$, где D – открытое подмножество $\mathbb{R}^n$, $\Lambda=[c_1,c_2]$, $c_1\leq 0$, $c_2>0$, причём замыкание $\bar{D}$ содержит начало координат. Для простоты здесь приведём глобальную версию критерия положительной инвариантности, когда $D=\mathbb{R}^n$.

Пусть выполняются следующие предположения:

1. Существует непрерывная функция $V:\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}_{\geq 0}$, дифференцируемая всюду, кроме возможно нуля, и пять функций одной переменной $\underline{\alpha}, \bar{\alpha} \in K_\infty$, $\alpha:\mathbb{R}_{\geq 0} \to \mathbb{R}$, $\alpha \in C^0\left([0,\infty)\right)$, $\alpha(0)=0$, $\beta:\mathbb{R}_{\geq 0} \to \mathbb{R}_{\geq 0}$, $\beta \in C^0\left([0,\infty)\right)$, $\varphi \in K_0$ такие, что для всех x и λ справедливы неравенства

$$\underline{\alpha}\left(\|x\|\right) \leq V(x) \leq \bar{\alpha}\left(\|x\|\right),$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} f(x,\lambda) \leq \alpha\left(V(x)\right) + \beta\left(V(x)\right)\varphi\left(|\lambda|\right).$$

2. Существуют функции $\delta, \xi \in K_0$ такие, что для всех x и λ справедливо неравенство

$$-\xi\left(|\lambda|\right) - \delta\left(\|x\|\right) \leq g(x,\lambda) \leq 0.$$

Тогда [1], если существуют функция $\psi \in K \cap C^1\left((0,\infty)\right)$ и константа $a>0$ такие, что для всех $V \in [0,a]$ выполняется неравенство

$$F\left(\psi(V)\right) = \frac{\partial \psi(V)}{\partial x}\left[\alpha(V) + \beta(V)\varphi\left(\psi(V)\right)\right] + \delta\left(\underline{\alpha}^{-1}\left(V\right)\right) + \xi\left(\psi(V)\right) \leq 0, \qquad (3)$$

то множество

$$\Omega_a = \left\{(x,\lambda) \mid \lambda \in \mathbb{R}_{\geq 0}, \psi(a) \geq \lambda \geq \psi\left(V(x)\right), V(x) \in [0,a]\right\} \qquad (4)$$

положительно инвариантное для системы (2).

Для проверки критерия требуется найти функции из предположения и функцию ψ. Алгоритм поиска функции ψ для случая заданных функций из предположений предложен в работе [2]. А именно, если следующая задача вариационного исчисления разрешима

$$\begin{cases} a\psi(a) - \int_0^a \psi(V)dV \to \max \\ \text{для всех } V \in [0,a]: \\ \mathrm{F}\ (\psi(V)) \leq 0 \\ \psi(V) \geq 0 \\ \dfrac{d\psi(V)}{dV} > 0 \end{cases}$$

то условия критерия выполняются. Кроме того, при решении данной задачи мы также получаем оценку области притяжения (4).

Заметим, что полученная задача имеет ограничения на управление, фазовые переменные и смешанные ограничения, то есть является довольно трудной для аналитического решения. С другой стороны, независимо от размерности системы (2), полученная задача одномерная и может быть эффективна решена прямыми методами.

Кроме того, в работе [2] предложен алгоритм поиска функции поиска полиномиальной функции ψ в случае, когда функции из предположений $\underline{\alpha}^{-1}$, α, β, φ, δ, ξ – полиномы. Тогда задачу можно свести к оптимизации на полиномах [4], которая в некоторых случаях может решаться проще.

Для этого функция $\psi(V)$ ищется в классе полиномов степени n без свободного члена: $\psi(V) = p_1 V + p_2 V^2 + \ldots + p_n V^n$. Тогда, если следующая задача оптимизации разрешима

$$\begin{cases} a\psi(a) - \int_0^a \psi(V)dV \to \max \\ -\mathrm{F}\ (\psi(V)) - s_1(V)V - s_2(V)(a-V) \in \Sigma \\ \psi(V) - s_3(V)V \in \Sigma \\ \dfrac{d\psi(V)}{dV} - s_4(V)V \in \Sigma \\ s_i(V) \in \Sigma,\ i = 1,\dots 4 \end{cases}$$

то условия критерия выполняются.

Функция $\psi(V)$ и a являются переменными оптимизации, и полученная задача является нелинейной задачей оптимизации (nonlinear SDP) с полиномиальной целевой функцией и ограничениями типа билинейные матричные неравенства (BMI). Одним из способом решения является одномерный поиск по a. Если a фиксировано, то получаем задачу с линейной целевой функцией и ограничениями типа BMI. Эта задача также NP-трудная, но может быть эффективно решена для малых порядков n. При этом проверка полученного решения может быть осуществлена через решение задачи полуопределённого программирования (SDP).

3. Упрощённый критерий положительной инвариантности

Как показано выше, для проверки критерия требуется найти функции из двух предположений и непосредственно из самого критерия, что может быть довольно затруднительно. Таким образом, хотелось бы получить класс систем, для которых критерий автоматически выполняется, либо значительно упрощается его проверка. В результате, в работе [3] получен следующий упрощённый критерий положительной инвариантности:

Если существует непрерывная функция $V : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}_{\geq 0}$, дифференцируемая всюду, кроме возможно нуля, неотрицательные константы γ, b, k, d и положительные константы c_1, c_2, ρ_x, ρ_u такие, что для всех $\lambda \in [0, \rho_u]$ и $\|x\| \leq \rho_x$ выполняются неравенства $c_1\|x\|^2 \leq V(x) \leq c_2\|x\|^2$ и $\dfrac{dV}{dx} f(x,\lambda) \leq -\gamma V + b\lambda^2$ для первой подсистемы и $-k\lambda^2 - d\|x\|^2 \leq g(x,\lambda) \leq 0$ для второй, то множество (4) – положительно инвариантное для системы (2).

Упрощённый критерий позволяет выделить класс систем, для которых слабый аттрактор заведомо существует. Первая подсистема должна быть устойчивой в терминах «вход-состояние» и, более того, локально экспоненциально устойчивой при $\lambda = 0$. При этом производная функции запаса должна возрастать не быстрее, чем квадратичная функция по λ. Правая часть второй подсистемы, напротив, должна возрастать по своим аргументам не медленнее, чем квадратично.

Для полиномиальных систем проверка условий упрощённого критерия может быть сведена к задаче полуопределённого программирования, используя технику SOS-разложения [3]. Зададим функцию $V(x)$ в виде полинома чётной степени. Тогда, если существует решение следующих задач оптимизации:

$$\begin{cases} V(x) - c_1 x^T x \in \Sigma \\ c_2 x^T x - V(x) \in \Sigma \\ -\gamma V + b\lambda^2 - \dfrac{dV}{dx} f(x,\lambda) - s\lambda \in \Sigma \\ s \in \Sigma \\ c_1, c_2, \gamma, b \geq 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -g(x,\lambda) - s_1\lambda \in \Sigma \\ g(x,\lambda) + ku^2 + dx^T x - s_2\lambda \in \Sigma \\ s_i \in \Sigma \\ k, d \geq 0 \end{cases}$$

то выполняются условия упрощённого критерия положительной инвариантности.

Полученный критерий не позволяют анализировать системы, в которых максимальная степень второй подсистемы меньше двух, например, систему (1).

4. Поиск функций из предположений

Для оценки области притяжения используется оригинальная версия критерия, для которой требуется (3) знать функции из предположения. Более того, условия критерия зависят только от функций из предположений, поэтому их неудачный выбор может оказывать влияние на результат проверки критерия.

Так, рассмотрим следующие две системы:

$$\begin{cases} \dot{x} = -x^2 + \lambda \\ \dot{\lambda} = -|x|^3 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = -x^2 + \lambda \\ \dot{\lambda} = -0{,}5|x|^3 \end{cases} \quad (6)$$

Легко увидеть, что при $D = \mathbb{R}_{\geq 0}$, $\Lambda = \mathbb{R}$ и выборе функции $V(x) = x^2$, $\alpha(V) = -2V^{\frac{3}{2}}$, $\beta(V) = 2\sqrt{V}$, $\varphi(|\lambda|) = |\lambda|$, $\xi = 0$, $\delta(|x|) = |x|^3$ условия предположений выполняются для обеих систем. Тем не менее, для выбранных функций не удаётся найти $\psi(V)$, удовлетворяющую условиям критерия. В самом деле, рассмотрим параметризованную функцию $\delta(|x|) = \gamma|x|^3$. Тогда неравенство (3) примет вид $\mathrm{F} = \psi'(V)\left(-2V\sqrt{V} + 2\sqrt{V}\psi(V)\right) + \gamma V\sqrt{V}$. Разложим функцию $\psi(V)$ в ряд Тейлора в некоторой малой области $V \in [0, a]$. Тогда $\psi(V) \approx pV$ и $\mathrm{F} = \left(-2p + 2p^2 + \gamma\right)V\sqrt{V} \leq 0$ только если существует такое p, что $2p^2 - 2p + \gamma \leq 0$, что имеет место только при $\gamma \leq 0{,}5$. Для системы (6) можно взять функцию $\delta(|x|) = 0{,}5|x|^3$, при этом критерий выполняется при $\psi(V) = 0{,}5V$. Для системы (5) неравенство $\gamma|x|^3 \leq g(x,\lambda)$ справедливо при $\gamma \geq 1$, то есть условия критерия не выполняются.

Рассмотрим задачу поиска функций из предположений в случае, когда функции f и g являются полиномами.

Заметим, что неравенство

$$\dot{V} \leq \alpha\left(V(x)\right) + \beta\left(V(x)\right)\varphi\left(|\lambda|\right)$$

эквивалентно неравенству

$$\dot{V} \leq -\alpha_0\left(\|x\|\right) + \beta_0\left(\|x\|\right)\varphi\left(|\lambda|\right)$$

при $\alpha = -\alpha_0\left(\bar{\alpha}^{-1}\right)$, $\beta = \beta_0\left(\underline{\alpha}^{-1}\right)$. Таким образом, в предположении 1 требуется найти функции $V : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}_{\geq 0}$, $\underline{\alpha}, \bar{\alpha} \in \mathrm{K}_\infty$, $\alpha_0 \in \mathrm{K}$, $\beta_0 \in \mathrm{C}^0([0,\infty))$, $\varphi \in \mathrm{K}_0$ такие, что

$$\underline{\alpha}\left(\|x\|\right) \le V(x) \le \bar{\alpha}\left(\|x\|\right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} f(x,\lambda) \le -\alpha_0\left(\|x\|\right) + \beta_0\left(\|x\|\right)\varphi\left(|\lambda|\right)$$

для всех $(x,\lambda) \in D \times \Lambda$.

При $\beta_0 \equiv 1$ представленные неравенства являются условием устойчивости от входа к состоянию. В работе [5] предложен метод поиска полиномиальных функций, обеспечивающих выполнение неравенств в случае $D = \mathbb{R}^n$, $\Lambda = \mathbb{R}$. А именно, функции $\underline{\alpha}, \bar{\alpha}, \alpha, \varphi$ предлагается искать в виде $y(s) = \sum_{k=1}^{N} c_k s^{2k}$. В этом случае $y(s) \in \mathrm{K}_\infty$ тогда и только тогда, когда $s\frac{dy(s)}{ds} \ge 0$ для всех s. Тогда, если существуют функции указанного ранее вида и разложимые на сумму квадратов полиномы s_1, s_2, s_3, s_α, $s_{\bar{\alpha}}$, $s_{\underline{\alpha}}$, s_φ такие, что задача SOS-разложения

$$\begin{cases} V(x) - \underline{\alpha}\left(\|x\|\right) = s_1(x) \\ \bar{\alpha}\left(\|x\|\right) - V(x) = s_2(x) \\ \dfrac{\partial V}{\partial x} f(x,\lambda) - \varphi\left(|\lambda|\right) + \alpha\left(\|x\|\right) = -s_3(x,\lambda) \\ s\dfrac{d\xi_i(s)}{ds} = s_\xi(s),\ \xi \in \{\underline{\alpha}, \bar{\alpha}, \alpha, \varphi\} \end{cases}$$

разрешима для всех $x \in \mathbb{R}^n$ и $\lambda \in \mathbb{R}$, то система $\dot{x} = f(x,\lambda)$ является устойчивой от входа к состоянию и условия предположения 1 выполняются. Таким образом искомые функции можно находить, решая полученную задачу.

В некоторых случаях лучше иметь локальную версию алгоритма. Зададим области D и Λ в виде

$$D = \left\{x \mid x \in \mathbb{R}^n, \|x\| \le \rho_x\right\} \quad (7)$$

$$\Lambda = \left\{\lambda \mid \lambda \in \mathbb{R}, 0 \le \lambda \le \rho_\lambda\right\} \quad (8)$$

Тогда получим следующую задачу SOS-оптимизации, позволяющую находить функции из предположения 1:

$$\begin{cases} V(x) - \underline{\alpha}\left(\|x\|\right) = s_1(x) \\ \bar{\alpha}\left(\|x\|\right) - V(x) = s_2(x) \\ \varphi\left(|\lambda|\right) - \dfrac{\partial V}{\partial x} f(x,\lambda) - \alpha\left(\|x\|\right) - s_1\left(\rho_x^2 - \|x\|^2\right) - s_2\left(\rho_\lambda - \lambda\right) - s_3\lambda \in \Sigma \\ s\dfrac{d\xi_i(s)}{ds} = s_\xi(s),\ \xi \in \{\underline{\alpha}, \bar{\alpha}, \alpha, \varphi\} \\ s_1(x), s_2(\lambda), s_3(\lambda) \in \Sigma \end{cases}$$

Перейдём к поиску функций из предположения 2. Очевидно, что если x или λ не входят во второе уравнение системы (2), то функции δ и ξ соответственно можно положить равными нулю.

Будем искать функции δ и ξ в виде $y(s) = \sum_{k=1}^{N} c_k s^{2k}$. Рассмотрим сначала глобальны случай. Если следующие задачи SOS-разложения имеют решение:

$$-g(x,\lambda)\in\sum$$

$$\begin{cases} g(x,\lambda)+\xi\left(|\lambda|\right)+\delta\left(\|x\|\right)\in\Sigma \\ s\dfrac{d\delta(s)}{ds}\in\Sigma \\ s\dfrac{d\xi(s)}{ds}\in\Sigma \end{cases}$$

то условия предположения 2 справедливы.

Рассмотрим теперь локальный случай. Пусть области D и Λ задаются неравенствами (7) и (8) соответственно. Тогда, если следующие две задачи SOS-разложения

$$\begin{cases} -g(x,\lambda)-s_1\left(\rho_x-\|x\|^2\right)-s_2\left(\rho_\lambda-\lambda\right)\in\Sigma \\ s_1(x),s_2(\lambda),s_3(\lambda)\in\Sigma \end{cases}$$

$$\begin{cases} g(x,\lambda)+\xi\left(|\lambda|\right)+\delta\left(\|x\|\right)-s_1\left(\rho_x^2-\|x\|^2\right)-s_2\left(\rho_\lambda-\lambda\right)\in\Sigma \\ s\dfrac{d\delta(s)}{ds}\in\Sigma \\ s\dfrac{d\xi(s)}{ds}\in\Sigma \\ s_1(x),s_2(\lambda),s_3(\lambda)\in\Sigma \end{cases}$$

разрешимы, то условия предположения 2 выполняются.

5. Заключение

В работе представлен алгоритм для проверки предположений из критерия положительной инвариантности. Вместе с ранее представленными алгоритмами, данный результат позволяет эффективно оценивать наличие

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. S. A. Romanov. An algorithm for estimating attracting set of weak attractor for a class of unstable systems// Proceedings of the 20th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. St. Petersburg, 24-26 May 2017. Pp. 113-115. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970512.

3. Романов С.А. Упрощённый критерий положительной инвариантности для класса нелинейных систем. 72-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019, с. 100-104.

4. A Tutorial on Sum of Squares Techniques for Systems Analysis / Papachristodoulou A., Prajna S. // Proceedings of the 2005 American Control Conference, June 2005, pp. 2686–2700.

5. Ichihara H. Sum of Squares Based Input-to-State Stability Analysis of Polynomial Nonlinear Systems // SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 5, No. 4, pp. 218–225, July 2012.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-136-142

Якименко Ольга Игоревна, Колесников Анатолий Аркадьевич, Калий Дмитрий Сергеевич.

Южный федеральный университет

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ПРИВОДНЫМ АППАРАТОМ, КОМПЕНСИРУЮЩАЯ ВНЕШНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ.

Аннотация. *Работа иллюстрирует применение принципа интегральной адаптации синергетической теории управления для синтеза законов управления пространственным движением автономного подводного аппарата (АПА), компенсирующих внешние возмущающие воздействия. 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, позволяющий компенсировать внешнее возмущение путем накопления ошибки регулирования и сведения ее к нулю.*

Ключевые слова: *Автономный подводный аппарат, система автоматического управления, математическая модель, метод АКАР, инварианты, инвариантное многообразие, функциональное уравнение, синергетическая теория управления, интегральная адаптация, нелинейное управление.*

Annotation. *The work illustrates the application of the principle of integrated adaptation of the synergetic control theory for the synthesis of the control laws the spatial motion of an autonomous underwater vehicle (AUA), compensating for external disturbing influences. The objectives of the synthesis are the stabilization of the AUA to a predetermined depth and movement at this depth with constant speed, a given course and zero roll. Using the principle of integral adaptation, a guarantee regulator is constructed, which allows to compensate external disturbance by accumulating a regulation error and reducing it to zero.*

Keywords: *Autonomous underwater vehicles, automatic control systems, mathematical models, methods ACAR invariant, invariant manifolds, functional equations, synergetic control theory, integral adaptation, nonlinear control.*

Введение

Широкий спектр новых возможностей, открывающихся перед исследователями Мирового океана благодаря использованию автономных подводных аппаратов (АПА), обуславливает бурный рост интереса ученых и конструкторов к проблемам проектирования и эксплуатации данного класса технических средств. Надо отметить, практически все современные разработки конструкций АПА являются многоцелевыми [1-3]. Термин – автономность подводного аппарата говорит о том, что он может выполнять поставленные цели без участия человека на борту. Увеличение разнообразия и сложности, решаемых с помощью АПА задач влечет за собой усложнение конструкции подводных аппаратов. Что, в свою очередь, приводит к построению более совершенных систем управления.

Проблема синтеза систем управления подвижными объектами актуальна и в настоящее время, ее решению посвящено большое количество научных статей. Многие специалисты по автоматике заинтересованы данной темой [4-11]. Разбираясь в опубликованных работах по рассматриваемой теме, можно заметить, что авторы находят систему управления движением АПА, используя классические методы теории автоматического управления, предполагающие линейное или линеаризованное математическое описание управляемых

процессов и скалярное управление, что не может не сказаться как на адекватности математического описания процессов, так и на эффективности разработанных алгоритмов.

В данной работе применяется новый метод синтеза регулятора – метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) синергетической теории управления [12-15]. Важно отметить, что базовые положения синергетической концепции системного синтеза не только согласуются с принципами построения интеллектуальных систем управления, но и позволяют конкретно реализовать искусственную направленную самоорганизацию проектируемых систем. Используемый в работе векторный принцип управления предполагает работу с полной нелинейной моделью движения объекта и позволяет более эффективно воздействовать на систему через различные каналы управления (чем их больше, тем легче управлять поведением системы).

Описание математической модели АПА

Математическая модель (1) пространственного движения АПА имеет следующий вид [16]:

$$\dot{x}_1 = \frac{u_1 - 0.5pV^2v^{2/3}(-c_x^{\alpha}x_2/V + c_x^{\delta}x_3/V + c_x^{\delta_г}u_2 + c_x^{\delta_в}u_3) - m_z x_5 x_3 + m_y x_6 x_2}{m_x} + M_{dist},$$

$$\dot{x}_2 = \frac{0.5pV^2v^{2/3}(-c_y^{\alpha}x_2/V + c_y^{\omega_z}x_6 + c_y^{\delta_г}u_2) - m_x x_6 x_1 + m_z x_4 x_3}{m_y},$$

$$\dot{x}_3 = \frac{0.5pV^2v^{2/3}(c_z^{\beta}x_3/V + c_z^{\omega_y}x_5 + c_z^{\delta_в}u_3) - m_y x_4 x_2 + m_x x_5 x_1}{m_z},$$

$$\dot{x}_4 = \frac{0.5pV^2v(m_x^{\beta}x_3/V + m_x^{\omega_x}x_4 + m_x^{\Delta\delta_г}u_4)}{J_x},$$

$$\dot{x}_5 = \frac{0.5pV^2v(m_y^{\beta}x_3/V + m_y^{\omega_x}x_5 + m_y^{\delta_в}u_3) - x_4x_6(J_x - J_z) - x_1x_3(m_x - m_z)}{J_y},$$

$$\dot{x}_6 = \frac{0.5pV^2v(-m_z^{\alpha}x_2/V + m_z^{\omega_z}x_6 + m_z^{\delta_г}u_2) - x_4x_5(J_x - J_y) - x_1x_2(m_y - m_x)}{J_z},$$

$$\dot{x}_7 = x_1 - x_2x_{12} + x_3x_{11},$$

$$\dot{x}_8 = x_1x_{12} + x_2 - x_3x_{10},$$

$$\dot{x}_9 = -x_1x_{11} + x_2x_{10} + x_3,$$

$$\dot{x}_{10} = \frac{x_4 + x_4x_{10}x_{12} - x_5x_{12} + x_6x_{12}^2}{1 + x_{10}x_{12}},$$

$$\dot{x}_{11} = \frac{x_5 - x_6x_{12}}{1 + x_{10}x_{12}},$$

$$\dot{x}_{12} = \frac{x_6 + x_5x_{11}}{1 + x_{10}x_{12}}.$$

(1)

С учетом переменных состояния $x_1 = V_x$, $x_2 = V_y$, $x_3 = V_z$, $x_4 = \omega_x$, $x_5 = \omega_y$, $x_6 = \omega_z$, $x_7 = x_g$, $x_8 = y_g$, $x_9 = z_g$, $x_{10} = \theta$, $x_{11} = \psi$, $x_{12} = \phi$ и управляющих воздействий $u_1 = T$, $u_2 = \delta_г$, $u_3 = \delta_в$, $u_4 = \Delta\delta_Г$.

Переменные V_x, V_y, V_z и $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – 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 $q = 0.5\rho V^2$, ν – объемное водоизмещение аппарата; T – сила тяги по продольной оси OX, создаваемая тяговым движителем; $\delta_в$ – угол перекладки вертикального руля, $\delta_Г$ – гидродинамический дифферентирующий момент управления, $\Delta\delta_Г$ – гидродинамический кренящий момент управления, M_{dist}. –внешнее возмущение.

В связи с тем, что автономный подводный аппарат, как и любой другой объект управления, подвержен влиянию внешних возмущающих воздействий, синтезируемый регулятор должен обеспечивать их подавление. Посмотрим на поведение системы (1), в которой на переменную x_1 действует внешнее кусочно-постоянное возмущение $M_{dist} = -0.1$, образованное набегающим потоком жидкости. Графики переходных процессов переменных состояния при заданных инвариантах $x_1^* = 1,\ x_8^* = -10,\ x_{10}^* = 0,\ x_{11}^* = 2.5$, $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = T_7 = 7$ (выход АПА на заданную глубину и движение на этой глубине с постоянными скоростью, заданным курсом и нулевым креном) и управляющих воздействиях, найденных методом АКАР [17] представлены на рисунках 1–4.

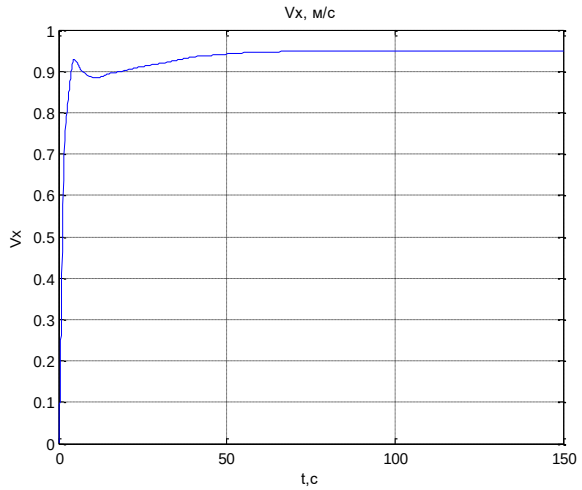


Рисунок 1 – График проекции на ось OX вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА

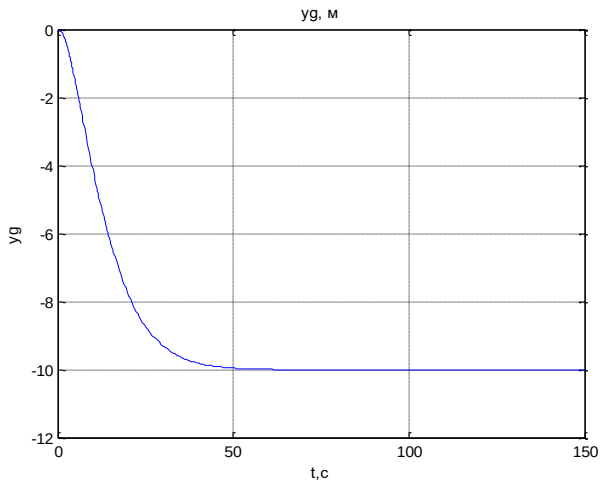


Рисунок 2 – График координаты y_g центра масс АПА в базовой системе координат

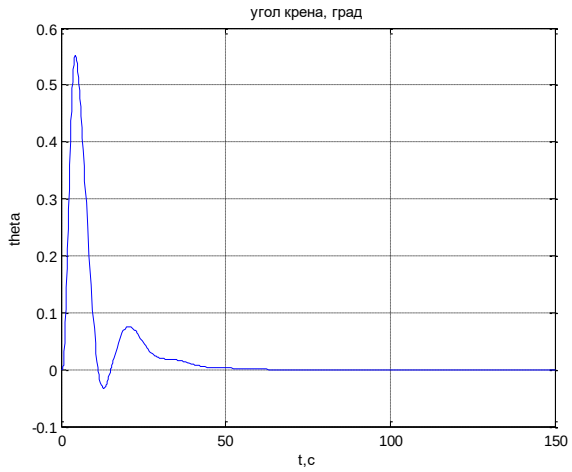


Рисунок 3 – Графикугла крена

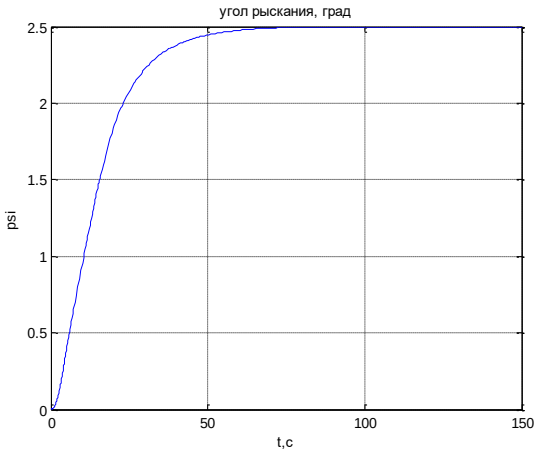


Рисунок 4 – График угла рыскания

По полученным результатам моделирования можно заметить невыполнение одной из задач управления, а именно $x_1^* = 1$, так как на изменение переменной x_1 непосредственно влияет внешнее возмущение. То есть при введении внешнего воздействия найденный методом АКАР регулятор не отрабатывает выполнение всех целевых инвариантов. Таким образом, для синтеза адаптивных законов управления, способных компенсировать внешние возмущающие воздействия, следует использовать другие подходы синергетической теории управления.

Синтез синергетических законов управления

В соответствии с принципом интегральной адаптации синергетической теории управления, позволяющим компенсировать внешние возмущения за счет введения в структуру модели нелинейных интеграторов, рассматриваемую систему (1) необходимо расширить для перевода указанных возмущений из разряда внешних сил во внутренние. Дополнив исходную математическую модель динамической моделью возмущений $\dot{w}_1 = x_1 - x_1^*$, заданных в виде кусочно-постоянной функции и, в первой строке системы уравнений (1), добавляем значение w_1 – внешнее неизвестное возмущение, образованное набегающим потоком жидкости.

Осуществляем синтез алгоритмов методом АКАР, но с некоторым изменением: финишную макропеременную, отражающую инвариант, отраженную в интеграторе, задают следующим образом:

$$\psi_{фин} = инвариант + \sum_{ш} \gamma_1 w_1. \qquad (2)$$

Здесь, в (2) γ_1 – коэффициенты, из условия устойчивости финишной декомпозированной системы возмущения, w_1 – переменные динамических возмущений. В рассматриваемом случае инвариантные многообразия будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= x_1 - x_1^* + \gamma w_1 = 0, \\ \psi_2 &= x_2 - \phi_2 = 0, \\ \psi_3 &= x_4 - \phi_3 = 0, \\ \psi_4 &= x_5 - \phi_4 = 0. \end{aligned} \qquad (3)$$

С учетом (3) декомпозированная система имеет восьмой порядок, но нас, с точки зрения процедуры синтеза, прежде всего, интересуют уравнения, описывающие динамику управляемых переменных – глубины, угла крена и угла рыскания на пересечении инвариантных многообразий.

$$\dot{x}_8 = x_1 x_{12} + \phi_2 - x_3 x_{10},$$
$$\dot{x}_{10} = \frac{\phi_3 + \phi_3 x_{10} x_{12} - \phi_4 x_{12} + x_6 x_{12}^2}{1 + x_{10} x_{12}}, \quad (4)$$
$$\dot{x}_{11} = \frac{\phi_4 - x_6 x_{12}}{1 + x_{10} x_{12}}.$$

Как видно из (4) на x_8, x_{10}, x_{11} можно влиять непосредственно через внутренние управляющие воздействия ϕ_2, ϕ_3, ϕ_4, то итоговые инвариантные многообразия будут следующими.

$$\psi_5 = x_8 - x_8^*,$$
$$\psi_6 = x_{10} - x_{10}^* = 0, \quad (5)$$
$$\psi_7 = x_{11} - x_{11}^* = 0.$$

Функции ϕ_2, ϕ_3, ϕ_4 из (5) находятся из решения системы функциональных уравнений вида $T_i \dot{\psi}_i + \psi_i = 0$ при $j = 5,6,7$ в силу системы (4). Получаем выражение для функций ϕ_2, ϕ_3, ϕ_4, подставляя их в (19), находим значения для ψ_2, ψ_3, ψ_4. Далее решается система вида $T_i \dot{\psi}_i + \psi_i = 0$ при $j = 1,2,3,4$ с учетом системы (1) и находим искомые законы управления $u_1, u_2, u_3 . u_4$.

Для проверки работоспособности регулятора для системы (1) при заданных инвариантах $x_1^* = 1,\ x_8^* = -10,\ x_{10}^* = 0,\ x_{11}^* = 2.5$, внешнем кусочно-постоянном возмущении $w_1 = -0.1$, при $\gamma = 20$ и $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = T_7 = 7$ графики переходных процессов переменных состояния, управляющих воздействий представлены на рисунках 5–8.

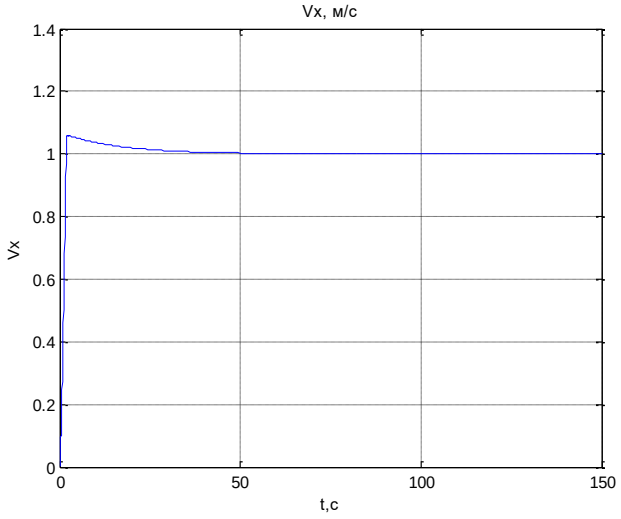


Рисунок 5 – График проекции на ось OX вектора линейной скорости перемещения центра масс АПА

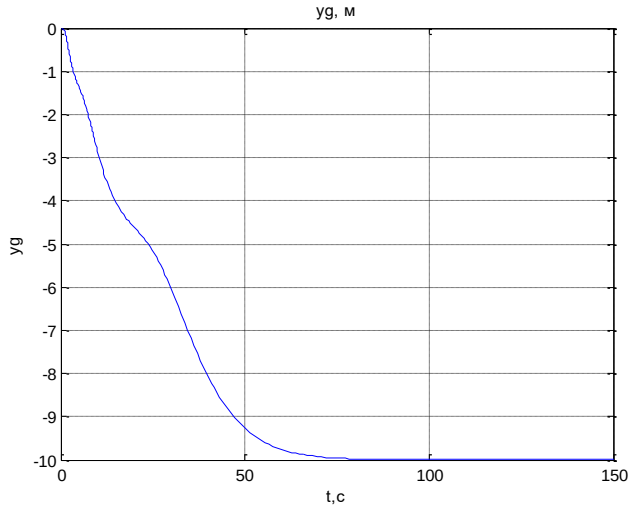


Рисунок 6 – График координаты y_g центра масс АПА в базовой системе координат

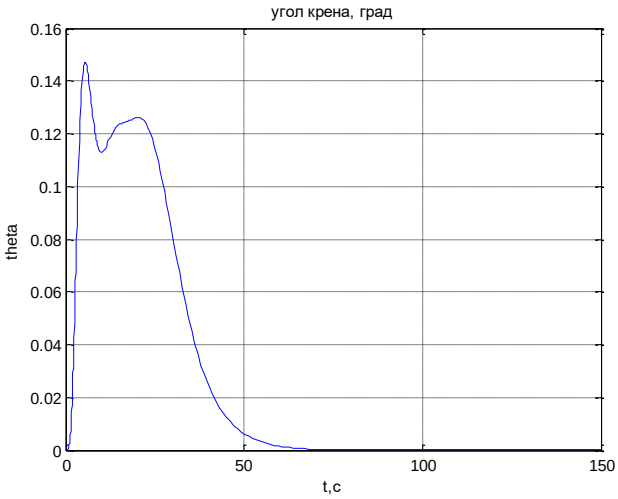


Рисунок 7 – График угла крена

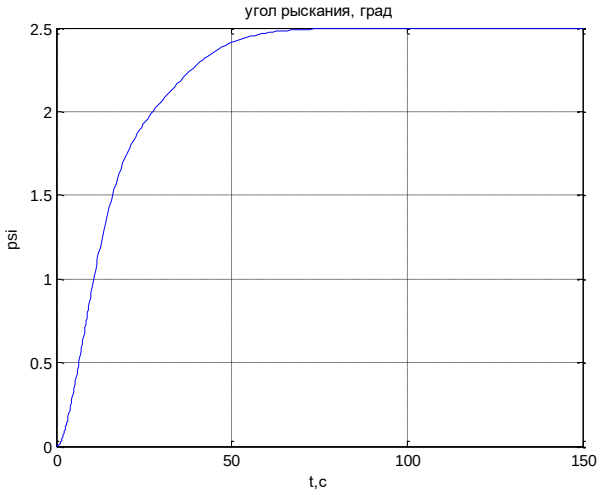


Рисунок 8 – График угла рыскания

По результатам моделирования видно, что новый регулятор с принципом интегральной адаптации выполняет задачи синтеза. Изменения переменных состояния объекта демонстрируют факт асимптотической устойчивости относительно стационарного состояния, даже при воздействии на объект внешнего неизвестного возмущения. Принцип интегральной адаптации позволяет регулятору компенсировать внешнее возмущение, путем накопления ошибки регулирования и сведения ее к нулю. Наличие небольшого перерегулирования для принципа интегральной адаптации является нормой, из-за наличия дополнительного интегрирующего звена.

Заключение

Как видно по результатам компьютерного моделирования, синтезируемый регулятор работает исправно, целевые инварианты достигают желаемых значений, несмотря на внешние воздействия. Полученные результаты демонстрируют эффективность методики синергетического синтеза при решении задач управления пространственным движением АПА, что побуждает к дальнейшим исследованиям в данной области.

Предполагается использование полученных результатов при построении законов управления АПА с гибридной силовой установкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боженов, Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики [Текст] / Ю.А. Боженов // Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики: сб. науч. тр. – Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2011. – Т.4. – № 1. – С. 47-68.

2. Быстров, Б.В. Самоходные автономные необитаемые подводные аппараты [Текст] / Б.В. Быстров, К.В. Кулешов, М.А. Светлов // Морской сборник. – 2016. – № 9. – С. 68-71.

3. Цалоев, В.М. Некоторые подходы к проектированию малогабаритных автономных подводных аппаратов [Текст] / В.М. Цалоев // Сборник материалов международной научной конференции «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2016», 2016. – Севастополь: ФГАОУ ВО Севастопольский ГУ. – С. 544-553.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Hyakudome, T. Design of Autonomous Underwater Vehicle [Text] / T. Hyakudome // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2011. – Vol. 8. – No. 1. – Pp. 131-139.

9. 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.

10. Чернухин, Ю.В. Искусственный интеллект и нейрокомпьютеры [Текст] / Ю.В. Чернухин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1997. – 273 с.

11. 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.

12. Колесников, А.А. Синергетическая теория управления [Текст] / А.А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

13. Синергетика: процессы самоорганизации и управления [Текст]: часть 2/ под общей редакцией А.А. Колесникова. – Таганрог: ТРТУ, 2005. – 358 с.

14. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. [Текст] / А.А. Колесников. – М: Едиториал УРСС / КомКнига, 2012. – 240 с.

15. 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.

16. Лукомский, Ю.А. Системы управления морскими подвижными объектами [Текст] / ЮА. Лукомский, В.С. Чугунов. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.

17. Якименко, О.И. Синергетический синтез нелинейных адаптивных законов управления пространственным движением автономного подводного аппарата. [Текст] / О.И. Якименко, И.А. Радионов // Сборник научных трудов VII всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». – Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 123-128.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-143-154

Инагбире Алин

Южный федеральный университет

МЕТОД СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ В УСЛОВИЯХ ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Аннотация. *В статье рассматриваются теоретические аспекты получения нелинейной модели для беспилотного летательного аппарата с жестким крылом, осуществляющего движение в среде с ветровыми возмущающими воздействиями. Приводится способ решения задачи синтеза регулятора для пространственного движения беспилотного летательного аппарата в полной нелинейной постановке. Описываются условия устойчивости синтезируемой системы. Приводиться компьютерное моделирование для доказательства эффективности представленного регулятора.*

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, ветровые возмущения, нелинейная математическая модель.*

Annotation. *The article discusses the theoretical aspects of obtaining a nonlinear model for an unmanned aerial vehicle with a rigid wing, which carries out movement in a medium with wind disturbances. A method for solving the controller synthesis problem for the spatial motion of an unmanned aerial vehicle in a full nonlinear formulation is presented. The stability conditions of the synthesized system are described. Computer simulation is presented to prove the effectiveness of the presented controller.*

Keywords: *unmanned aerial vehicle, wind disturbances, nonlinear mathematical model.*

В настоящее время инновационные организации используют беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для оказания медицинской помощи, в частности, транспортировку медикаментов в местах с плохо организованной дорожной инфраструктурой. Однако ветровые возмущения являются одним из основным факторов, препятствующих развитию перевозок по средствам беспилотных летательных аппаратов. Поэтому в работе поднимается актуальная тема, а именно, влияние ветровых возмущений на навигацию малогабаритного транспортного беспилотного летательного аппарата.

В отличие от традиционного подхода — конструирования отдельного стабилизирующего управлении для каждого канала (контура) регулирования, в представленной работе используется совместное (координированное) управление по всем переменным с целью перевода объекта в желаемое состояние. В этом случае для некоторых алгоритмов управления связи между каналами управления осуществляются не косвенно, через объект управления, а непосредственно формируются в регуляторе. В качестве базовой модели движения БПЛА возьмем модель пространственного движения летательного аппарата, представленного в связанной системе координат, которая описывается системой уравнений 12-го порядка. Так как в настоящее время с применением современные датчиков можно получить текущие значения практически всех координат системы, то все переменные состояния в модели будем считать измеряемыми.

При формировании математической модели БПЛА примем следующие попущения [1]:

- конструкция самолета считается жесткой;
- главные оси инерции БПЛА совпадают с осями связанной системой координат;
- масса БПЛА не изменяется, т.к. малогабаритные БПЛА используют аккумуляторные батареи для питания двигателя;

– БПЛА рассматривается как твердое тело.

Запишем уравнения движения БПЛА в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику и кинематику поступательного и вращательного движений. Уравнения движения БПЛА записываются в форме, когда динамика поступательного движения описывается системой дифференциальных уравнений в форме Коши [2]:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_x(t) &= V_y\omega_z - V_z\omega_y + \frac{1}{m}(R_x + G_x);\\
\dot{V}_y(t) &= V_z\omega_x - V_x\omega_z + \frac{1}{m}(R_y + G_y);\\
\dot{V}_z(t) &= V_x\omega_y - V_y\omega_x + \frac{1}{m}(R_z + G_z),
\end{aligned} \tag{1}$$

где m – масса ЛА; V_x, V_y, V_z – компоненты вектора линейной скорости $\mathbf{V}$; ω_x, ω_y, ω_z – проекции вектора угловой скорости ω вращения БПЛА на оси системы координат, которая связанная с центром масс БПЛА; R_x, R_y, R_z – проекции результирующих сил БПЛА на соответствующие оси связанной системы координат, G_x, G_y, G_z – проекции сил тяжести БПЛА.

Проекции сил тяжести БПЛА на связанные оси записываются следующим образом [3]:

$$\begin{aligned}
G_x &= -\mathrm{mg}\sin\vartheta;\\
G_y &= -mg\cos\vartheta\cos\gamma;\\
G_z &= mg\cos\vartheta\sin\gamma.
\end{aligned} \tag{2}$$

Выражения для результирующих сил R_x, R_y и R_z имеют вид:

$$\begin{aligned}
R_x &= -X + P_{дв}\cos(\phi_p);\\
R_y &= Y + P_{дв}\sin(\phi_p);\\
R_z &= Z,
\end{aligned} \tag{3}$$

где X – продольная; Y – нормальная; Z – боковая аэродинамические силы; $P_{дв}$ – суммарная сила тяги всех двигателей БПЛА; ϕ_p – угол установки двигателя. Динамика вращательного движения описывается уравнениями

$$\begin{aligned}
\dot{\omega}_x(t) &= \frac{I_y - I_z}{I_x}\omega_y\omega_z + \frac{1}{I_x}M_x;\\
\dot{\omega}_y(t) &= \frac{I_z - I_x}{I_y}\omega_x\omega_z + \frac{1}{I_y}M_y;\\
\dot{\omega}_z(t) &= \frac{I_x - I_y}{I_z}\omega_x\omega_y + \frac{1}{I_z}M_z,
\end{aligned} \tag{4}$$

где I_x, I_y, I_z – моменты инерции ЛА относительно соответствующих осей; M_x, M_y, M_z – составляющие суммарного вектора момента количества движения.

Уравнения кинематики поступательного движения можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= V_x \cos\psi \cos\vartheta + V_y\left(\sin\gamma \sin\psi - \cos\gamma \cos\psi \sin\vartheta\right) + \\
&+ V_z\left(\cos\gamma \sin\psi + \sin\gamma \cos\psi \sin\vartheta\right); \\
\dot{y}(t) &= V_x \sin\vartheta + V_y \cos\gamma \cos\vartheta - V_z \sin\gamma \cos\vartheta; \\
\dot{z}(t) &= -V_x \sin\psi \cos\vartheta + V_y(\sin\gamma \cos\psi + \cos\gamma \sin\psi \sin\vartheta) + \\
&+ V_z(\cos\gamma \cos\psi - \sin\gamma \sin\psi \sin\vartheta).
\end{aligned} \tag{5}$$

Подставляя в уравнения (1) выражения (2) и (3) и дополняя уравнениями (4) и (5), получим математическую модель пространственного движения БПЛА в связанной системе координат:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_x(t) &= V_y\omega_z - V_z\omega_y + \frac{1}{m}(-X + P_{дв}\cos(\phi_p) - mg\sin\vartheta); \\
\dot{V}_y(t) &= V_z\omega_x - V_x\omega_z + \frac{1}{m}(Y + P_{дв}\sin(\phi_p) - mg\cos\vartheta\cos\gamma); \\
\dot{V}_z(t) &= V_x\omega_y - V_y\omega_x + \frac{1}{m}(Z + mg\cos\vartheta\sin\gamma); \\
\dot{\omega}_x(t) &= \frac{I_y - I_z}{I_x}\omega_y\omega_z + \frac{1}{I_x}M_x; \\
\dot{\omega}_y(t) &= \frac{I_z - I_x}{I_y}\omega_x\omega_z + \frac{1}{I_y}M_y; \\
\dot{\omega}_z(t) &= \frac{I_x - I_y}{I_z}\omega_x\omega_y + \frac{1}{I_z}M_z; \\
\dot{X}(t) &= V_x \cos\psi \cos\vartheta + V_y\left(\sin\gamma \sin\psi - \cos\gamma \cos\psi \sin\vartheta\right) + \\
&+ V_z\left(\cos\gamma \sin\psi + \sin\gamma \cos\psi \sin\vartheta\right); \\
\dot{Y}(t) &= V_x \sin\vartheta + V_y \cos\gamma \cos\vartheta - V_z \sin\gamma \cos\vartheta; \\
\dot{Z}(t) &= -V_x \sin\psi \cos\vartheta + V_y(\sin\gamma \cos\psi + \cos\gamma \sin\psi \sin\vartheta) + \\
&+ V_z(\cos\gamma \cos\psi - \sin\gamma \sin\psi \sin\vartheta); \\
\dot{\vartheta}(t) &= \omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma; \\
\dot{\gamma}(t) &= \omega_x - \mathrm{tg}\,\vartheta\left(\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma\right); \\
\dot{\psi}(t) &= \frac{1}{\cos\vartheta}(\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma).
\end{aligned} \tag{6}$$

В математической модели движения БПЛА (6) переменными состояния являются: X, Y, Z – координаты центра масс БПЛА в земной системе координат; ϑ, γ, ψ – углы тангажа, крена и рыскания БПЛА, соответственно; V_x, V_y, V_z – проекции вектора линейной скорости БПЛА на оси связанной системы координат; ω_x, ω_y, ω_z – проекции вектора угловой скорости БПЛА на оси связанной системы координат.

Каналами управления в системе уравнении (6) будут являться аэродинамические моменты M_x, M_y, M_z, аэродинамические силы X, Y, Z, а так же $P_{дв}$ – сила тяги двигателя БПЛА.

В полете в плотных слоях атмосферы на БПЛА действуют силы, различные по своей природе [4]:

- массовые силы, обусловленные притяжением земли;
- аэродинамические силы, возникающие при движении БПЛА в воздушной среде;

– реактивные силы движителей, установленных на БПЛА.

Аэродинамические силы и моменты определяются конфигурацией ЛА и характер обтекания его воздушным потоком. Выражения для расчета аэродинамических сил и моментов общеприняты и не зависят типа ЛА [4]:

$$\begin{aligned} X &= C_x q S; \\ Y &= C_y q S; \\ Z &= C_z q S, \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} M_{xa} &= m_x q S l_{кр}; \\ M_{ya} &= m_y q S l_{кр}; \\ M_{za} &= m_z q S b_A, \end{aligned} \tag{8}$$

где S – площадь крыла самолета, $l_{кр}$ – размаха крыла, b_A – средняя аэродинамическая хорда крыла БПЛА, $\tilde{N}_x$, $\tilde{N}_y$, $\tilde{N}_z$, m_x, m_y, m_z – безразмерные коэффициенты аэродинамических сил и моментов БПЛА (в соответствующих системах координат), q – скоростной напор, определяемый формулой $q = \frac{\rho V^2}{2}$ в которой ρ – плотность воздуха, зависящая от высоты полета H.

Аэродинамические коэффициенты зависят от конфигурации каждого конкретного БПЛА, условий полета и ряда параметров полёта (например, угла атаки, угла скольжения, их производных, угловых скоростей вращения и т.д.) [5]:

$$\mathrm{C_{x,y,z}} = f\left(\delta, \mathrm{M}, \mathrm{Re}, \alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \omega_x, \omega_y, \omega_z\right);$$

$$\mathrm{m_{x,y,z}} = f\left(\delta, \mathrm{M}, \mathrm{Re}, \alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \omega_x, \omega_y, \omega_z\right);$$

где $\mathbf{M} = \frac{V}{a}$ – число Маха; a – скорость звука; δ – вектор значений углового положения рулевых поверхностей; $\mathbf{Re} = \frac{V b_A}{\nu}$ – число Рейнольдса; ν – коэффициент вязкости воздуха.

Чтобы проанализировать как движение воздуха влияет на моделирование самолета, необходимо сначала описать сам ветер как часть поля скоростей, в котором летает самолет. Воздушная масса находится в непрерывном состоянии движения из-за солнечного нагрева, вращения Земли или различных термодинамических и электромагнитных процессов. Вектор скорости атмосферы обычно изменяется как в пространстве, так и во времени и может быть разложен на среднее значение и отклонения от него. Стабильная скорость в заданном положении называется средней скоростью ветра, а оставшаяся колеблющаяся часть определяется как порыв. Ветер возникает в основном в навигации, в то время как турбулентность влияет в основном на стабильность самолета.

Обычная нотация вектора скорости воздушного потока относительно Земли – *W*. Исходя из вышеизложенного, поле общей скорости в атмосфере определяется следующим образом

$$W = W_M + W_F$$

где W_M – это средний вектор ветра и W_F – это турбулентность атмосферы.

Изучение влияния вектора ветра на летные качества самолета требует математической модели такого возмущения. Однако, детерминированное описание полного ветра невозможно, другими словами, оно не может быть описано аналитическими выражениями.

Для моделирования атмосферной турбулентности используются две спектральные формы случайной непрерывной турбулентности, предоставленные учеными фон Карман и Драйден. Для генерации вектора колебаний ветра с правильными характеристиками спектры скорости Фон Кармана используются для фильтрации единичного дисперсионного белого шумового сигнала с ограничением по полосе пропускания. Передаточные функции модели Von Karman перечислены ниже

$$H_u(S) = \frac{\sigma_u \sqrt{\frac{2}{\pi}\frac{L_u}{V}\left(1+0.25\frac{L_u}{V}s\right)}}{1+1.357\frac{L_u}{V}s+0.1987\left(\frac{L_u}{V}\right)^2 s^2}$$

$$H_v(S) = \frac{\sigma_v \sqrt{\frac{1}{\pi}\frac{L_v}{V}\left(1+2.7478\frac{L_v}{V}s+0.3398\left(\frac{L_v}{V}\right)^2 s^2\right)}}{1+2.9958\frac{L_v}{V}s+1.9754\left(\frac{L_v}{V}\right)^2 s^2+0.1539\left(\frac{L_v}{V}\right)^3 s^3}$$

$$H_w(S) = \frac{\sigma_w \sqrt{\frac{1}{\pi}\frac{L_w}{V}\left(1+2.7478\frac{L_w}{V}s+0.3398\left(\frac{L_w}{V}\right)^2 s^2\right)}}{1+2.9958\frac{L_w}{V}s+1.9754\left(\frac{L_w}{V}\right)^2 s^2+0.1539\left(\frac{L_w}{V}\right)^3 s^3}$$

где L_u, L_v, L_w – длины шкалы турбулентности, σ_u, σ_v, σ_w – интенсивность турбулентности and V – скорость БПЛА.

С точки зрения драйденских моделей формирующие фильтры получают из спектральных квадратных корней уравнений спектра, а передаточные функции задаются следующими функциями

$$H_u(s) = \sigma_u \sqrt{\frac{2L_u}{\pi V}}\frac{1}{1+\frac{L_u}{V}s}$$

$$H_v(s) = \sigma_v \sqrt{\frac{L_v}{\pi V}}\frac{1+\frac{\sqrt{3}L_v}{V}s}{\left(1+\frac{L_v}{V}s\right)^2}$$

$$H_w(s) = \sigma_w \sqrt{\frac{2L_w}{\pi V}}\frac{1+\frac{\sqrt{3}L_w}{V}s}{\left(1+\frac{L_w}{V}s\right)^2}$$

В реальных условиях параметры среднего ветра изменяются по траектории полета за счет перемещения воздушных масс относительно друг друга. Существенное изменение скорости или направления ветра на относительно небольшом расстоянии называется сдвигом ветра и представляет особый интерес при подходах к взлету и посадке.

Следует различать вертикальный сдвиг ветра, при котором параметры ветра изменяются в зависимости от изменения высоты, и горизонтальный сдвиг ветра, который относится к изменениям в ветровом поле на горизонтальных расстояниях. Экспоненциальное изменение среднего ветра с высотой над уровнем моря может быть рассчитано на основе данных о ветре, измеренном на контрольной высоте 10 метров над уровнем моря

$$W(h) = W_{10}\left(\frac{h}{h_{10}}\right)^{a}$$

где $W(h)$ – скорость ветра на высоте h, W_{10} – скорость ветра на высоте $h_{10} = 10\,m$ и a – Экспонента Хелманна, которая зависит от формы и расположения береговой линии местности.

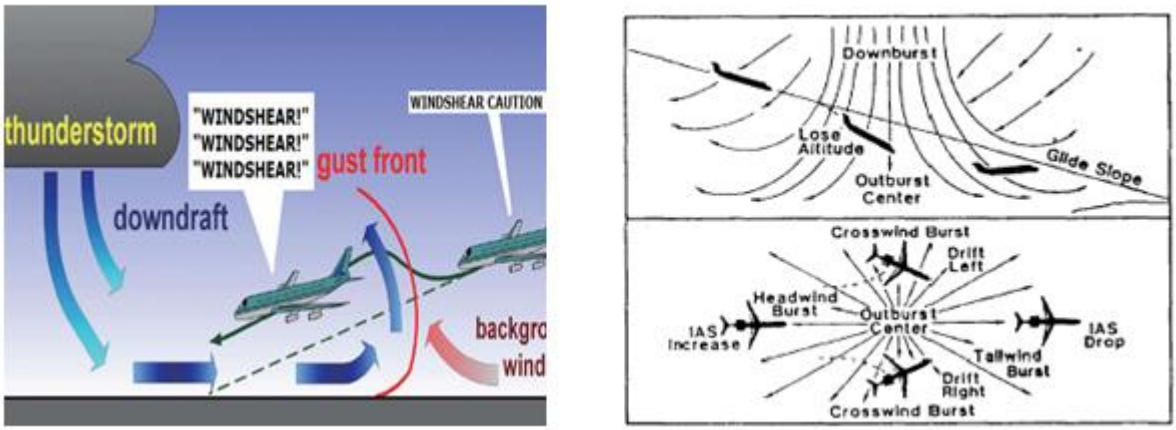


Рисунок 1. Смещение ветра

Независимо от того, относимся ли мы к движению воздушного судна относительно окружающей атмосферы или к движению последнего относительно воздушного судна, полет возможен благодаря разнице скоростей воздушного потока над верхней и нижней поверхностью крыла воздушного судна. Направление и величина воздушного потока, испытываемого самолётом, изменяется при движении самой воздушной массы относительно Земли. Ветер воздействует как на продольные, так и поперечные переменные самолета, способствуя его нелинейной, связанной и сложной динамике.

Когда самолет летит в ветреную погоду, он подвергается воздействию неизвестных внешних сил, которые могут поставить под угрозу его конструктивную целостность, а также внутреннюю стабильность бортового контроллера. Дополнительные силы могут ухудшить общие характеристики полета, что в некоторых ситуациях может привести к авиационным катастрофам. Во избежание таких нежелательных ситуаций система управления должна обеспечить дополнительные усилия управления для выполнения определенных маневров полета, таких как взлет или посадка с поперечным ветром.

Существует два стандартных способа борьбы с устойчивым поперечным ветром. Первый называется "крабовым" и балансирует поперечный ветер, направляя нос самолета на ветер. Второй, известный как "боковое скольжение", заключается в поддержании курса самолета в соответствии с инерциальной трассой и корректировке на дрейф ветра с небольшим углом наклона. Как правило, во время маневров поперечного ветра требуются как входы руля, так и входы элеронов. Некоторые критические условия полета могут потребовать максимальной мощности управления, чтобы учесть сильный попутный ветер во время посадки. В целях повышения эффективности управления рулем можно рассмотреть возможность внесения структурных усовершенствований на этапе разработки концепции самолета. Таким образом, турбулентные ветры могут катить самолет во время взлета или посадки, и для противодействия этому движению требуется дополнительное управление элеронами. Спойлеры верхнего крыла могут быть использованы для повышения эффективности элеронов, чтобы удерживать крыло при сильном поперечном ветре.

Относительно низкая скорость полета малых БПЛА делает их особенно подверженными воздействию ветрового поля на всех этапах полета. Аэродинамические силы, создаваемые их крыльями, сильно зависят от относительного ветра, основываясь на аэродинамических знаниях, полученных в предыдущем разделе. Последнее изменяется в зависимости от подвижной

атмосферы, что приводит к дисбалансу между силами полета и, таким образом, неконтролируемым поведением самолета. Кроме того, если подъем резко падает из-за неблагоприятного ветра, сопротивление становится основным компонентом аэродинамической силы и может произойти срыв.

Поскольку синтезируемая система должна парировать внешние возмущающие воздействия, действующим на БПЛА, систему (9) ввести $f \in R^{\vartheta}$ – вектор возмущающих сил.

Для учета влияния ветровых возмущений в математической модели объекта управления необходимо ввести вектора ветровых возмущений в виде следующих компонент $f = \begin{bmatrix} f_{xH} & f_{yH} & f_{zH} \end{bmatrix}^T$ в модель объекта в виде добавочных составляющих к вектору скорости БПЛА [6].

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_x + f_{xH} \\ V_y + f_{yH} \\ V_z + f_{zH} \end{bmatrix} \tag{9}$$

Согласно СТУ [7-10], Для учета внешних ветровых возмущений введем вектор переменных $z = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix}^T$, которые будут являться оценкой внешних возмущений с учетом принципов интегральной адаптации [7-10]. Запишем расширенную модель движения БПЛА следующим образом:

$$\begin{aligned}
&\dot{V}_x(t) = V_y\omega_z - V_z\omega_y + \frac{1}{m}(c_x qS + P_{дв}\cos(\phi_p) - mg\sin\vartheta) + z_1;\\
&\dot{V}_y(t) = V_z\omega_x - V_x\omega_z + \frac{1}{m}(c_y qS + P_{дв}\sin(\phi_p) - mg\cos\vartheta\cos\gamma) + z_2;\\
&\dot{V}_z(t) = V_x\omega_y - V_y\omega_x + \frac{1}{m}(c_z qS + mg\cos\vartheta\sin\gamma) + z_3;\\
&\dot{\omega}_x(t) = \frac{I_y - I_z}{I_x}\omega_y\omega_z + \frac{1}{I_x}m_x Sql;\\
&\dot{\omega}_y(t) = \frac{I_z - I_x}{I_y}\omega_x\omega_z + \frac{1}{I_y}m_y Sql;\\
&\dot{\omega}_z(t) = \frac{I_x - I_y}{I_z}\omega_x\omega_y + \frac{1}{I_z}m_z Sqb_A;\\
&\dot{X}(t) = V_x\cos\psi\cos\vartheta + V_y(\sin\gamma\sin\psi - \cos\gamma\cos\psi\sin\vartheta) +\\
&+V_z(\cos\gamma\sin\psi + \sin\gamma\cos\psi\sin\vartheta);\\
&\dot{Y}(t) = V_x\sin\vartheta + V_y\cos\gamma\cos\vartheta - V_z\sin\gamma\cos\vartheta;\\
&\dot{Z}(t) = -V_x\sin\psi\cos\vartheta + V_y(\sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\sin\psi\sin\vartheta) +\\
&+V_z(\cos\gamma\cos\psi - \sin\gamma\sin\psi\sin\vartheta);\\
&\dot{\vartheta}(t) = \omega_y\sin\gamma + \omega_z\cos\gamma;\\
&\dot{\gamma}(t) = \omega_x - \mathrm{tg}\,\vartheta(\omega_y\cos\gamma - \omega_z\sin\gamma);\\
&\dot{\psi}(t) = \frac{1}{\cos\vartheta}(\omega_y\cos\gamma - \omega_z\sin\gamma);\\
&\dot{z}_1 = \xi_1(V_x - V_{x0});\\
&\dot{z}_2 = \xi_2(V_y - V_{y0});\\
&\dot{z}_3 = \xi_3(V_z - V_{z0}),
\end{aligned} \tag{10}$$

где V_{x0}, V_{y0}, V_{z0} – задание по составляющим компонентов воздушной скорости.

Из расширенной модели движения БПЛА (10) видно, что при $V_x = V_{x0}$, $V_y = V_{y0}$, $V_z = V_{z0}$ производные от Z_1, Z_2, Z_3 будут равны нулю, что будет означать парирование внешних ветровых возмущений, влияющих на полет БПЛА.

Таким образом динамика БПЛА описывается системой уравнений 12-го порядка и все переменные состояния в модели (10) измеряемые. Искомый вектор управления содержит шесть компонент, которые входят линейно в первые шесть уравнений системы (10), притом в каждое из уравнений входит только одно управление. В этой связи поставим задачу синергетического синтеза законов векторного управления объектом (10). Требуется найти в аналитической форме вектор управлений **u**, обеспечивающий перевод объекта (10) из произвольного начального состояния в области допустимых значений фазовых координат на пересечение введенных притягивающих инвариантных многообразий, а затем в заданное состояние, определяемое следующими целями:

– управление ориентацией;

– стабилизация ЛА в горизонтальном положении с заданными углами атаки и скольжения;

– движение ЛА с заданной воздушной скоростью и высотой.

Таким образом, определим целевые инвариантные соотношения системы следующим образом:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \vartheta_0, \\ \gamma &= \gamma_0, \\ \psi &= \psi_0, \\ Z &= Z_0. \end{aligned} \tag{11}$$

Проведем аналитический синтез законов управления для модели объекта управления (10) методом Аналитического Конструирования Агрегированных Регуляторов (АКАР) на основе введения совокупности инвариантных многообразий.

Введем первую совокупность макропеременных синтезируемой системы:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= V_x - \phi_1, \\ \psi_2 &= \omega_x - \phi_2, \\ \psi_3 &= \omega_y - \phi_3 \\ \psi_4 &= \omega_z - \phi_4, \end{aligned} \tag{12}$$

которая будет удовлетворять решению системы основных функциональных уравнений вида:

$$T_i \frac{d\psi_i}{dt} + \psi_i = 0, \; i = 1..4. \tag{13}$$

Несложно доказать, что решение $\psi_i = 0$, $i = 1..4$ системы (13) асимптотически устойчиво при всех $T_i > 0$.

При попадании ИТ подсистемы (12) в окрестность многообразия $\psi_i = 0$ происходит редукция или динамическая декомпозиция системы, в результате которой поведение системы будет описываться следующей моделью

$$\dot{V}_y(t) = V_z\phi_2 - \phi_1\phi_3 + \frac{1}{m}(c_y qS + P_{дв}\sin(\phi_p) - mg\cos\vartheta\cos\gamma) + z_2;$$

$$\dot{V}_z(t) = \phi_1\phi_3 - V_y\phi_2 + \frac{1}{m}(c_z qS + mg\cos\vartheta\sin\gamma) + z_3;$$

$$\dot{X}(t) = \phi_1\cos\psi\cos\vartheta + V_y(\sin\gamma\sin\psi - \cos\gamma\cos\psi\sin\vartheta) +$$

$$+V_z(\cos\gamma\sin\psi + \sin\gamma\cos\psi\sin\vartheta);$$

$$\dot{Y}(t) = \phi_1\sin\vartheta + V_y\cos\gamma\cos\vartheta - V_z\sin\gamma\cos\vartheta;$$

$$\dot{Z}(t) = -\phi_1\sin\psi\cos\vartheta + V_y(\sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\sin\psi\sin\vartheta) +$$

$$+V_z(\cos\gamma\cos\psi - \sin\gamma\sin\psi\sin\vartheta);$$

$$\dot{\vartheta}(t) = \phi_3\sin\gamma + \phi_4\cos\gamma;$$

$$\dot{\gamma}(t) = \phi_2 - \mathrm{tg}\,\vartheta(\phi_3\cos\gamma - \phi_4\sin\gamma);$$

$$\dot{\psi}(t) = \frac{1}{\cos\vartheta}(\phi_3\cos\gamma - \phi_4\sin\gamma);$$

$$\dot{z}_1 = \xi_1(\phi_1 - V_{x0});$$

$$\dot{z}_2 = \xi_2(V_y - V_{y0});$$

$$\dot{z}_3 = \xi_3(V_z - V_{z0}). \qquad (14)$$

Далее вводим еще одну совокупность макропеременных

$$\begin{aligned} \psi_5 &= Z - Z_0, \\ \psi_6 &= \vartheta - \vartheta_0, \\ \psi_7 &= \gamma - \gamma_0, \\ \psi_8 &= \psi - \psi_0, \end{aligned} \qquad (15)$$

которая будет удовлетворять решению системы основных функциональных уравнений вида:

$$T_i\frac{d\psi_i}{dt} + \psi_i = 0,\ i = 5..8. \qquad (16)$$

Исходя из принципов синтеза методом АКАР, решение $\psi_i = 0$, $i = 5..8$ системы (16) асимптотически устойчиво при всех $T_i > 0$.

Из совместного решения систем уравнений (15), (16) с учетом редуцированной модели (14) находим выражения для внутренних управлений

$$\phi_1 = \frac{-T_6 V_y(\sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\sin\psi\sin\vartheta)}{T_6\sin\psi\cos\vartheta} -$$
$$-\frac{T_6 V_z(\cos\gamma\cos\psi - \sin\gamma\sin\psi\sin\vartheta) + Z + Z_0}{T_6\sin\psi\cos\vartheta};$$
$$\phi_2 = \frac{T_8 tg\vartheta\cos^2\gamma T_5(-\vartheta + \vartheta_0 - 2\vartheta\cdot\cos\vartheta T_7\sin\gamma)}{T_5T_7T_8} + \quad (17)$$
$$+\frac{T_5T_8 tg\vartheta\sin^2\gamma(\vartheta-\vartheta_0) - T_5T_7(\gamma-\gamma_0)}{T_5T_7T_8};$$
$$\phi_3 = \frac{T_5\sin\gamma(\vartheta-\vartheta_0) + T_7\cos\gamma\cos\vartheta(\psi-\psi_0)}{T_5T_7};$$
$$\phi_4 = \frac{-T_5\cos\gamma(\vartheta-\vartheta_0) + T_7\sin\gamma\cos\vartheta(\psi-\psi_0)}{T_5T_7}.$$

Выражения для финальных законов управления можно получить путем подстановки (17) в (12) с учетом (15), (16).

Таким образом, замкнутая система управления движением БПЛА включает в себя четыре регулятора, обеспечивающих необходимое положение ЛА в пространстве при воздействии ветровых возмущений.

Результаты моделирования замкнутой системы управления пространственным движением легкого беспилотного летательного аппарата представлены на рис. 2 – 11.

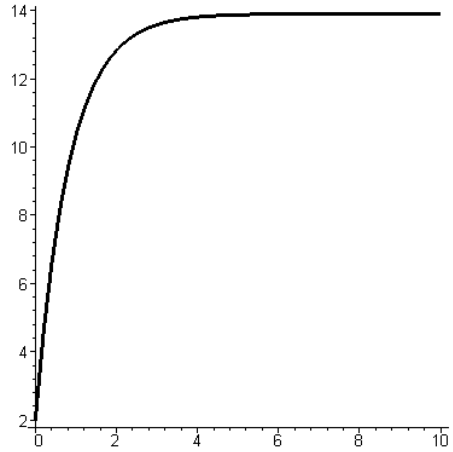


Рисунок 2 Переходной процесс относительно проекции земной скорости на ось *OX*

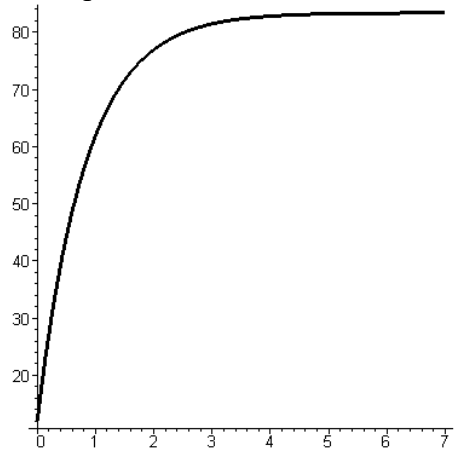


Рисунок 3 Переходной процесс относительно проекции земной скорости на ось *OY*

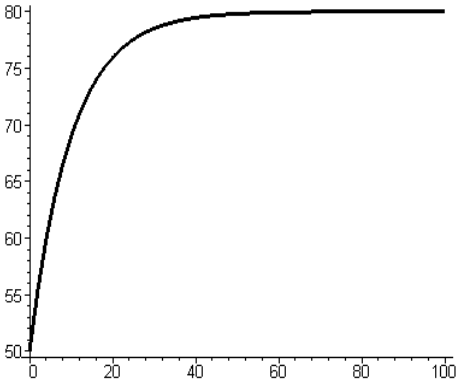


Рисунок 4 Переходной процесс относительно проекции земной скорости на ось OZ

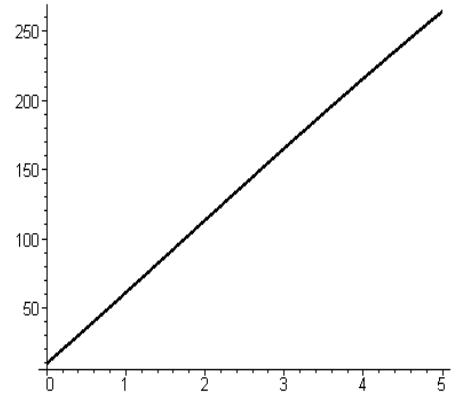


Рисунок 5 Переходной процесс относительно оси OX

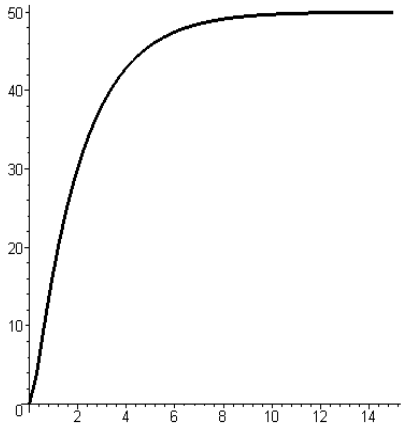


Рисунок 6 Переходной процесс относительно оси *OY*

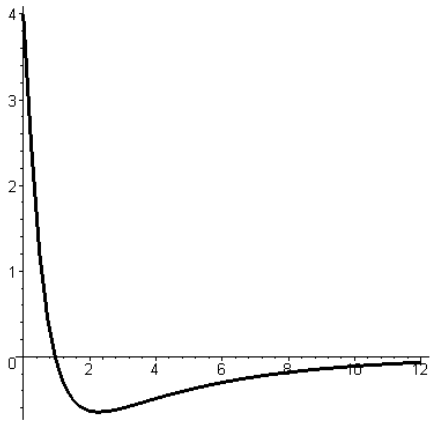


Рисунок 7 Переходной процесс относительно оси *OZ*

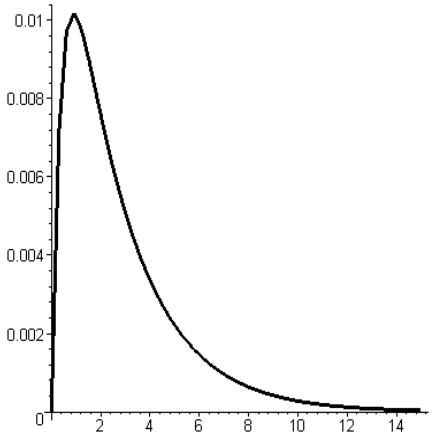


Рисунок 8 Переходной процесс относительно угла тангажа

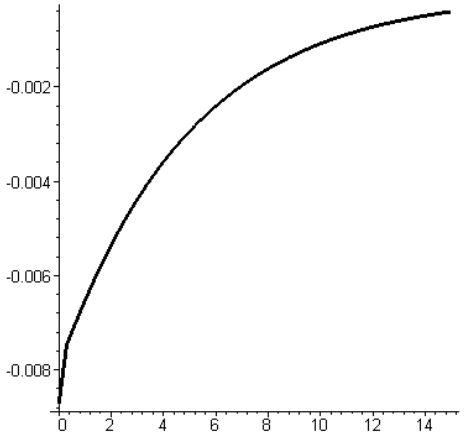


Рисунок 9 Переходной процесс относительно угла крена

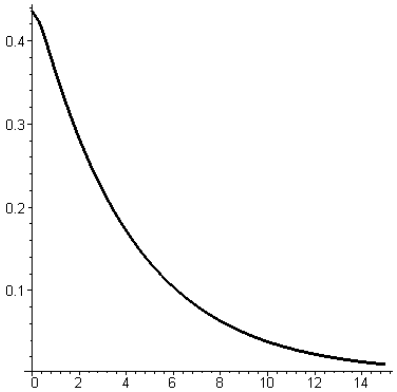


Рисунок 10 Переходной процесс относительно угла рысканья

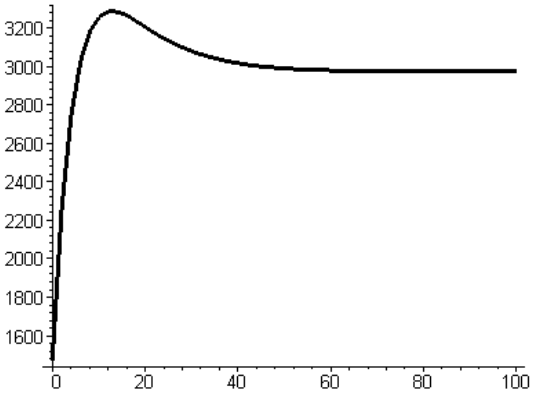


Рисунок 11 Переходной процесс относительно тяги двигателя

Из графиков переходных процессов видно, что синтезированная система управления пространственным движением БПЛА с достаточно высокой точностью отрабатывает программные задания по выполнению различных технологических задач в условиях постояннодействующих возмущающих воздействий.

В работе был представлен важный научный результат, а именно, теоретические аспекты получения нелинейной модели для БПЛА с жестким крылом, осуществляющего движение в постоянно изменяющейся среде. Рассмотрена и эффективно решена задача синтеза векторных регуляторов для пространственного движения БПЛА общего назначения в полной нелинейной постановке имеет важное самостоятельное научно-техническое значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В. Аэродинамика самолета: Динамика продольного и бокового движения. — М.: Машиностроение, 1979.

2. Крымов Б.Г., Рабинович Л.В., Стеблецов В.Г. Исполнительные устройства систем управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1987.

3. Колесников А.А. Кобзев В.А. Динамика полета и управление: синергетический подход. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009.

4. Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетическое управление нелинейными электроприводами III. Векторное управление асинхронными электроприводами // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 2. – С. 25-36.

5. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.

6. Колесников А.А., Кобзев В.А., Нгуен Ф. Синергетический синтез систем управления движением самолетов-амфибий, функционирующих в экстремальных условиях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. –№ 5 (106). – С. 150-154.

7. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.

8. Веселов Г.Е. Синергетическое векторное управление асинхронными электроприводами исполнительных механизмов летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 2. – С. 27-33.

9. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ТРТУ. –2001. – № 5 (23). – С. 7-27.

10. Колесников А. А. Прикладная синергетика: основы системного синтеза. — Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-155-165

Синицын Александр Сергеевич

АО «Научно-конструкторское бюро вычислительных систем», Таганрог

НЕЛИНЕЙНЫЙ СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКОЙ АВТОМОБИЛЯ

Аннотация. *Для реализации современных систем управления принято использовать наиболее полные нелинейные модели поведения управляемого объекта, поэтому первое что должен сделать разработчик системы управления – составить математическую модель. Результатом данной работы является нелинейная динамическая модель высокого порядка, описывающая вертикальные перемещения подрессоренной массы расположенной на гидропневматической опоре. Отличительной особенностью полученной модели подвески является учет конструктивных особенностей в динамической модели, что позволяет явно задавать такие конструктивные ограничения подвески как предел перемещения штока гидроцилиндра.*

Ключевые слова: *активная подвеска, нелинейная модель, кинематические ограничения, синергетический регулятор.*

Abstract. *For the implementation of modern control systems, it is necessary to use the most complete non-linear behavior models of the controlled object, therefore the first thing that the developer must do is to create a mathematical model. The result of this work is a high order nonlinear dynamic model of hydro-pneumatic quarter car suspension, that describing the vertical displacement of the sprung mas. A main advantage of the designed suspension model is the consideration the design features in the dynamic model, which makes it possible to set such structural limitations of the suspension as the limit of movement of the hydraulic cylinder rod.*

Keywords: *active suspension, non-linear model, kinematic constraints, synergetic control.*

Введение

Большинство современных производителей автомобилей, которые пытаются уменьшить или устранить колебания кузова, добавляют к традиционной системе подвески пневматические или гидравлические элементы. Пожалуй, самой известной из этих систем является система подвески Citroën Hydractive, представленная в модели XM, выпущенной в 1989 году. Система амортизации Hydractive основана на «традиционной» гидропневматической подвеске компании Citroën, в которой гидравлический аккумулятор расположен сверху каждого из четырех амортизаторов.

Система активной амортизации является нелинейной системой, формальное описание которой может быть представлено как минимум двумя видами математических моделей, а именно динамическими [1, 2] и кинематическими [3, 4]. В динамических моделях каналами управления служат движущие силы исполнительных устройств. В динамических моделях учитываются инерционные составляющие физического объекта, а также возможное влияние внешней среды. В кинематических моделях данными свойствами объекта управления пренебрегают, а в качестве управляющих воздействий выступают линейные и угловые скорости. Выбор той или иной математической модели обусловлен задачами, решаемыми в процессе изучения систем активной амортизации. Для реализации современных систем управления принято использовать наиболее полные нелинейные модели поведения управляемого объекта, поэтому в качестве основы, будет использоваться динамическая модель системы активной амортизации.

Математическая модель одно опоры

Необходимость расширения динамической модели активной подвески кинематическими ограничениями вытекает из противоречивых требований к системе управления: с одной стороны система управления подвеской должна обеспечивать как можно лучшую изоляцию кузова автомобиля от возможных колебаний и ударов, а с другой стороны в процессе управления необходимо соблюдать конструктивные ограничения. Системы активной подвески развивают значительные усилия, что в случае «неосторожного» управления может привести к повреждению конструкции подвески.

При исследовании вопросов моделирования и управления активной подвеской, часто используется известная модель вертикального перемещения одной опоры автомобиля (четверти автомобиля). Эта модель позволяет изучать вертикальное поведение транспортного средства в зависимости от типа и характеристик используемой подвески. На рисунке 1 продемонстрирована обобщенная модель одной опоры системы активной подвески.

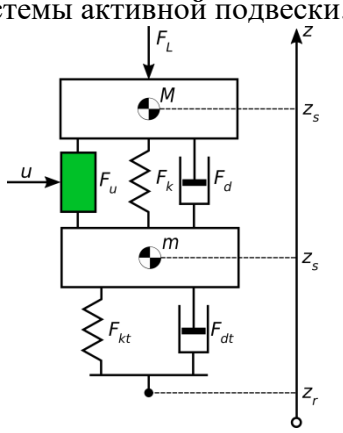


Рисунок 1 — Обобщенная модель одной опоры системы активной подвески

Представленная на рисунке 1 модель описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M\ddot{z}_s = F_f + F_d + F_L + F_u \\ m\ddot{z}_{us} = -F_k - F_d - F_L - F_u + F_{kt} + F_{dt} + m_g \end{cases} \quad (1)$$

где M — подрессоренная масса, кг; m — неподрессоренная масса, кг; z_s — вертикальное перемещение подрессоренной массы, м; z_{us} — вертикальное перемещение неподрессоренной массы, м; z_r — вертикальное «перемещение» дорожного покрытия, м; F_k и F_d — силы, производимые пружиной и демпфирующим элементами подвески соответственно (пассивные составляющие амортизатора), Н; F_L — внешняя сила, обусловленная статической нагрузкой (массой M) и динамическими нагрузкам, вызванными опрокидывающими моментами при ускорении и повороте, Н; F_u — сила, производимая исполнительным устройством (активная составляющая подвески), Н; F_{kt} и F_{dt} — силы упругости и демпфирования амортизирующего основания (например, шины) соответственно, Н. В общем случае силы F_k, F_d, F_L, F_{kt}, F_{dt} и F_u являются многопараметрическими нелинейными функциями как времени так и переменных состояния системы (1) и системы, описывающей исполнительный механизм активной подвески.

В настоящее время существует множество возможных конструктивных решений для автомобильной подвески, однако, наиболее распространенными являются два типа [5]: двурычажная и макферсона. Подвеска макферсона получила широкое распространение в легковых переднеприводных автомобилях, ее достоинствами являются простота и малый объем занимаемого пространства. В спортивных и престижных легковых автомобилях по прежнему применяется двурычажная подвеска, так как она обеспечивает лучшие геометрические характеристики подвески и снижает нагрузку на кузов автомобиля [6]. Активная двурычажная подвеска состоит из следующих ключевых элементов:

– гидравлический цилиндр - предназначен для создания усилия, необходимого для перемещения конструкции подвески вместе с шиной;

– гидравлический аккумулятор - является заряженным накопителем гидравлической жидкости;

– пропорциональный электромагнитный клапан - управляет потоком гидравлической жидкости;

– шина - выполняет роль упругого элемента, обеспечивающего контакт с дорогой.

Для детального рассмотрения всех свойств представленной системы активной подвески необходимо построить её математическую модель. Необходимо рассмотреть именно динамическую модель системы, не ограничиваясь лишь кинематическими уравнениями. Необходимость рассмотрения данных моделей одновременно определяется из специфики поставленной задачи синтеза нелинейной системы управления, а именно построения нелинейной системы управления активной подвеской, учитывающей конструктивные и технологические ограничения.

В гидравлических системах активной подвески гидроцилиндр одновременно выполняет функции исполнительного устройства, демпфирующего и пружинного элемента, поэтому можно сразу определить, что $F_k = F_d = 0$. Так как рассматривается только одна вертикальная опора подвески, то $F_L = gM$. Для определения остальных составляющих сил, необходимо обратиться к кинематической схеме, представленной на рисунке 2. Основываясь на схеме можно записать уравнение проекции силы, производимой гидроцилиндром, на ось z:

$$F_c^z = F_c \cos(\alpha)$$

где α — угол между осью z и продольной осью гидроцилиндра, рад. Угол α находится из треугольника, образованного сторонами l_1, l_2, l_3:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{l_3^2 + l_1^2 - l_2^2}{2 l_1 l_3}\right)$$

Длина стороны l_3 определяется длиной рычагов и относительным перемещением подрессоренной и неподрессоренной масс:

$$l_3 = \sqrt{l_2^2 + l_1^2 - 2 l_2 l_1 \cos(\gamma)}$$

где γ — угол между рычагом l_2 и осью z, определяемый выражением:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{z_s - z_{us}}{l_2}\right) + \frac{\pi}{2}.$$

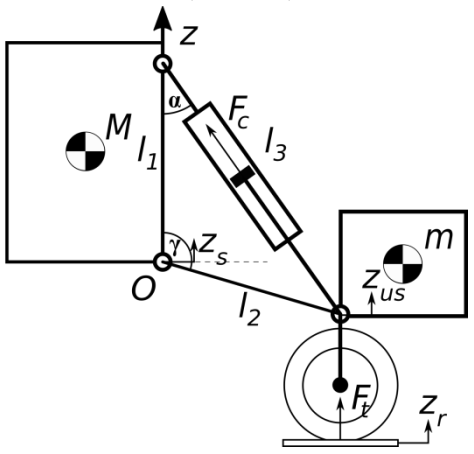


Рисунок 2 — Кинематическая схема одной опоры

Сила, проводимая гидроцилиндром, определяется выражением [7]: $F_c = p_c A_c - \eta \dot{x}$ где p_c — давление в гидроцилиндре, Па; A_c — площадь поршня, м2; η — коэффициент динамической

вязкости; $\dot{x} = \dot{l}_3$ — скорость перемещения поршня в гидроцилиндре, м/с. Коэффициент динамической вязкости зависит от используемой гидравлической жидкости и определяется выражением: $\eta = \nu\rho$, где ν — кинематическая вязкость, м^2/с, ρ — плотность жидкости кг/м3. Изменение давления в гидроцилиндре описывается дифференциальным уравнением [8]:

$$\dot{p}_c = \frac{\left(q_c + \dot{x}A_c\right)\beta}{V_{c0} + xA_c}$$

где q_c — поток жидкости, направленный в цилиндр, м^3/с; V_{c0} — начальный объем жидкости в цилиндре, м^3; $x = l_3 - \sqrt{l_2^2 + l_1^2}$ – перемещение штока цилиндра, м; β — объёмный модуль упругости жидкости, Па. Для определения потоков жидкости необходимо обратится к гидравлической схеме подвески, изображенной на рисунке 3. На рисунке 3 обозначениям соответствует: Ц1 — гидравлический цилиндр; АК1 — гидропневматический аккумулятор; ДР1, ДР2 — регулируемый дроссель; РД1 — регулятор давления; Н1 — гидравлический насос. Исходя из гидравлической схемы, можно составить уравнение потока жидкости, входящего в цилиндр:

$$q_c = q_a + q_u$$

где q_a — поток жидкости между гидроцилиндром и аккумулятором, м^3; q_u — поток жидкости, создаваемый регулируемыми дросселями, м^3. Поток жидкости между гидроцилиндром и аккумулятором зависит от параметров дросселя Д1 и определяется выражением:

$$q_a = C_{d1}A_{d1}\sqrt{\frac{2}{\rho}}\frac{p_a - p_c}{\sqrt[4]{\left(p_a - p_c\right)^2 + p_{cr1}^2}},$$

где C_{d1} — коэффициент уменьшения потока; A_{d1} — проходное сечение дросселя, м^2; p_a — давление в гидравлическом аккумуляторе, Па, p_{cr1} — критическое давление перехода в турбулентный режим потока. Критическое давление определяется исходя из числа Рейнольдса:

$$p_{cr1} = \frac{\rho}{2}\left(\frac{\mathrm{Re}_{cr}\,\nu}{C_{d1}D_{h1}}\right)^2$$

где Re_{cr} — критическое число Рейнольдса; $D_{h1} = \sqrt{4A_{d1}/\pi}$ — диаметр отверстия, м.

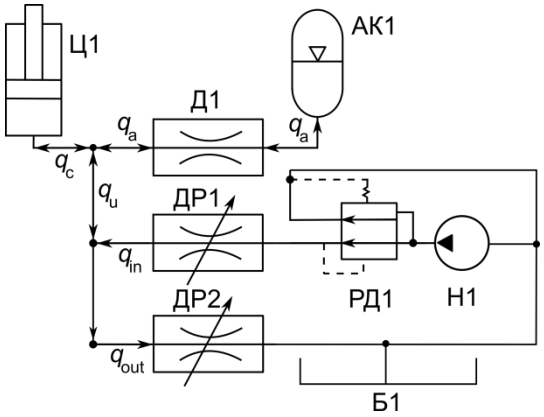


Рисунок 3 — Гидравлическая схема одной опоры

Изменение давления в гидравлическом аккумуляторе описывается дифференциальным уравнением [8]:

$$\dot{p}_a = -q_a k p_{pr} V_T^k \left(\left(\frac{p_{pr}V_T^k}{p_a}\right)^{\frac{1}{k}}\right)^{-k-1} \qquad (2)$$

где k — адиабатический индекс; p_{pr} — давление в пневматической части аккумулятора при пустой гидравлической части (начальный «заряд» аккумулятора), Па; V_T — максимальный объем гидравлической части аккумулятора, м^3. Поток жидкости, создаваемый регулируемыми, дросселями определяется из выражения:

$$q_u = q_{in} - q_{out} \tag{3}$$

где q_{in} и q_{out} — потоки жидкости, проходящие через регулируемые дроссели ДР1 и ДР2, соответственно. Поток жидкости, проходящий через регулируемый дроссель ДР1 рассчитывается по формуле:

$$q_{in} = C_{din} A_{din} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{p_{in} - p_c}{\sqrt[4]{\left(p_{in} - p_c\right)^2 + p_{crin}^2}} \tag{4}$$

где

$$p_{crin} = \frac{\rho}{2}\left(\frac{\mathrm{Re}_{cr}\,\nu}{C_{din} D_{hin}}\right)^2$$

$D_{hin} = \sqrt{4A_{din}/\pi}$ — диаметр отверстия дросселя ДР1, м; p_{in} — давление во входной (питающей) магистрали, Па; $A_{din} = U_{in}k_{in}$; U_{in} — напряжение, приложенное к обмотке дросселя ДР1, В; k_{in} — коэффициент преобразования, м^2/В.

Поток жидкости, проходящий через регулируемый дроссель ДР2 рассчитывается по формуле:

$$q_{out} = C_{dout} A_{dout} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{p_{out} - p_c}{\sqrt[4]{\left(p_{out} - p_c\right)^2 + p_{crout}^2}} \tag{5}$$

где

$$p_{crout} = \frac{\rho}{2}\left(\frac{\mathrm{Re}_{cr}\,\nu}{C_{dout} D_{hout}}\right)^2$$

$D_{hout} = \sqrt{4A_{dout}/\pi}$ — диаметр отверстия дросселя ДР2, м; p_{out} — давление выпускной (сбрасывающей) магистрали, Па; $A_{dout} = U_{out}k_{out}$; U_{out} — напряжение, приложенное к обмотке дросселя ДР2, В; k_{out} — коэффициент преобразования, м^2/В.

С целью рационального управления потоком q_u целесообразно определить что в каждый момент времени может быть открыт только один дроссель (ДР1 или ДР2), в таком случае, с учетом уравнений (4) и (5), уравнение (3) можно переписать в виде:

$$q_u = u f_{flow}$$

где u — управляющее напряжение, В;

$$f_{flow} = \begin{cases} C_{din} k_{in} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{p_{in} - p_c}{\sqrt[4]{\left(p_{in} - p_c\right)^2 + p_{crin}^2}}, & \text{если } u > 0 \\ C_{dout} k_{out} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{p_{out} - p_c}{\sqrt[4]{\left(p_{out} - p_c\right)^2 + p_{crout}^2}}, & \text{если } u < 0 \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Согласно кинематической схеме, представленной на рисунке 2, осталось определить нормальную силу реакции шины. Предположив, что шина деформируется только в одном направлении можно записать следующее выражение для расчета нормальной силы:

$$F_t = LWp_t + b_t \frac{d\Delta r}{dt}$$

где L — длина пятна контакта с дорогой, м; W — ширина шины, м; $\Delta r = z_r - z_{us}$ — деформация шины, м; b_t — коэффициент демпфирования шины, Н·с/м.

На рисунке 4 представлена иллюстрация деформации колеса при контакте с дорогой. Длина пятна контакта с дорогой находится из выражения:

$$L = 2\sqrt{2r_n\Delta r - \Delta r^2}$$

где rn — номинальный радиус ненагруженной шины, м.

Допуская, что деформация шины — это адиабатический процесс, из равенства

$$p_{tn}V_{tn} = p_t\left(V_{tn} - \Delta V_t\right)$$

можно определить давление в шине изменяется следующим образом:

$$p_t = \frac{V_{tn}p_{tn}}{V_{tn} - \Delta V_t}$$

где V_{tn} — объем ненагруженной шины, м^3; p_{tn} — давление в ненагруженной шине, Па; ΔV_t — изменение объема шины как результат деформации, м^3. Обратившись к рисунку 4 можно записать выражение для расчета изменения объема шины:

$$\Delta V_t = W\left(r_n^2 \arccos\left(\frac{r_n - \Delta r}{r_n}\right) - \frac{L\left(r_n - \Delta r\right)}{2}\right)$$

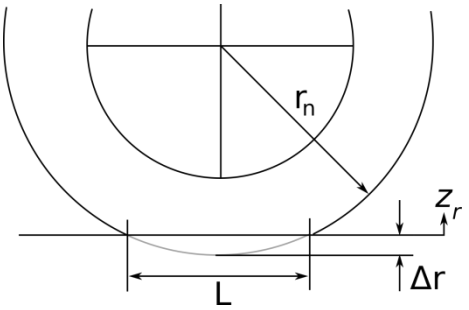


Рисунок 4 — Деформация колеса при контакте с дорогой

Дифференциальные уравнения (1)–(3), описывают динамику двурычажной активной гидравлической опоры и могут быть использованы для синтеза нелинейных законов управления, максимально учитывающих свойства объекта управления.

Синтез закона управления

После определения основных характеристик и математической модели объекта управления, согласно методу АКАР, необходимо сформулировать систему инвариантов, которые отражают суть технологической задачи системы активной подвески. Основным назначением как активной, так пассивной подвески является снижение ударов и вибраций, передаваемых подрессоренной массе в результате изменения профиля дороги. Дополнительной задачей для

активной подвески является изменение положения подрессоренной массы в пространстве, т.е. задача изменения дорожного просвета. Таким образом, можно составить математическое описание технологической задачи системы активной подвески:

$$z_{us}(t) = z_z \qquad (6)$$

где z_z – требуемое положение подрессоренной массы, м. Система, осуществляющая управление активной подвеской должна стремиться к сохранению равенства (2.51) в условиях конструктивных ограничений. Для представленной математической модели, таким

ограничением является перемещение поршня гидроцилиндра – $|x(t)| \le x_{\max}$, где $x_{\max}$ – максимальное перемещение поршня, м.

Следует отметить, что система активной подвески всегда имеет как минимум один неопределенный параметр, значение которого нельзя задать постоянной величиной. Для исследуемого объекта управления такой величиной является подрессоренная масса M, которая меняется в зависимости от полезной нагрузки, количества и веса пассажиров. Предполагая, что в процессе движения вес автомобиля остается постоянным, можно записать выражение для подрессоренной массы в следующем виде:

$$\begin{aligned} m_s &= M_n + \Delta M(t), \\ \frac{\Delta M(t)}{dt} &= 0, \end{aligned} \tag{7}$$

где M_n – номинальное значение подрессоренной массы, кг; $\Delta M(t)$ – изменение подрессоренной массы вследствие полезной нагрузки, кг. Для подавления полиномиальных возмущений в синергетической теории управления существует метод интегральной адаптации, заключающийся в введении в закон управления некоторого количества интегрирующих звеньев, необходимых для обеспечения астатизма заданного порядка [9]. Для подавления возмущения, описываемого уравнением (7) достаточно обеспечить астатизм первого порядка, т.е. ввести в закон управления одно интегрирующее звено вида:

$$\dot{\xi}(t) = \psi_{inv}(t), \tag{8}$$

где ξ – интеграл по времени выражения для инвариантного многообразия, $\psi_{inv}(t)$, – макропеременная, описывающая инвариантное многообразие, относительно которого необходимо обеспечить астатизм. Сформируем макропеременную:

$$\psi_{inv}(t) = v_s(t) + k\left(z_s(t) - z_z + c_1 \tan\left(\frac{x(t)\pi}{2x_{\max}} \right) \right) \tag{9}$$

где, $v_s(t) = \dot{z}_s(t)$ – вертикальная скорость подрессоренной массы, м/с; c_1 – положительная константа; $k = 1/T_d$; T_d – постоянная времени декомпозированной системы. Для сохранения инвариантности $\psi_{inv}(t)$, в условиях параметрических возмущений необходимо записать макропеременную с учетом дополнительных интегрирующих звеньев:

$$\psi(t) = v_s(t) + k\left(z_s(t) - z_z + c_1 \tan\left(\frac{x(t)\pi}{2x_{\max}} \right) \right) + c_2\xi(t) \tag{10}$$

где c_2 – положительная константа. Макропеременная (10) должна удовлетворять решению $\psi(t) = 0$ функционального уравнения [9]:

$$\ddot{\psi}(t) + \dot{\psi}2\lambda + \lambda^2 = 0 \tag{11}$$

где λ – положительная константа, определяющая скорость сближения ИТ объекта управления с целевым многообразием. Решив (11) относительно u с учетом уравнений, описывающих объект управления получим закон управления который переводит объект управления в окрестность многообразия $\psi(t) = 0$, в результате чего происходит динамическая декомпозиция модели объекта управления. Динамика объекта управления на многообразии $\psi(t) = 0$ (при условии $c_1 \approx 0$) описывается дифференциальным уравнением:

$$\dot{z}_s(t) = -k\left(z_s(t) - z_z \right), \tag{12}$$

которое имеет единственную точку равновесия $z_s(t) = z_z$, следовательно, полученный закон управления решает поставленную технологическую задачу, «разрывая» связь между перемещением подрессоренной и неподрессоренной масс.

Исследование эффективности

С целью исследования эффективности функционирования замкнутой системы проведем компьютерное моделирование замкнутой системы в условиях воздействия внешних возмущений со стороны дороги и неопределенности подрессоренной массы. Предположим, что профиль дороги, по которой движется колесо автомобиля, описывается уравнением:

$$z_r(t) = \begin{cases} 0, если\ t \le 5 \\ A\sin(\omega(t-5)), иначе \end{cases} \quad (13)$$

Для демонстрации особенностей исследуемого закона управления, определим три возможных варианта моделирования замкнутой системы:

1. в кузове находится один водитель (ΔM = 20), автомобиль движется по неровностям высотой 10 см (A = 0,05, ω = 1);
2. в кузове находится один водитель (ΔM = 20), автомобиль движется по неровностям высотой 20 см (A = 0,1, ω = 1);
3. в кузове находятся водитель и пассажир (ΔM = 80), автомобиль движется по неровностям высотой 20 см (A = 0,1, ω = 1).

Для исследования влияния учета ограничений на характеристики подвески, необходимо провести моделирование по п. 1-3 с аналогичным законом управления, не учитывающим конструктивных ограничений. Чтобы «отключить» учет ограничений, достаточно в законе управления определить $c_1 = 0$, таким образом закон управления будет приведен к результату синтеза не модифицированным методом АКАР.

Для получения правдоподобных результатов моделирования необходимо переписать уравнение силы, развиваемой гидроцилиндром, с учетом наличия упоров:

$$F_c = \begin{cases} p_c A_c - \eta\dot{x} & , если\ x \le x_{\max} \\ p_c A_c - \eta\dot{x} - k_s\left(|\, x(t) - x_{\max}\,|\right) - b_s\dot{x} & , если\ x > x_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

где k_s, b_s – коэффициенты упругости и демпфирования упоров гидроцилиндра.

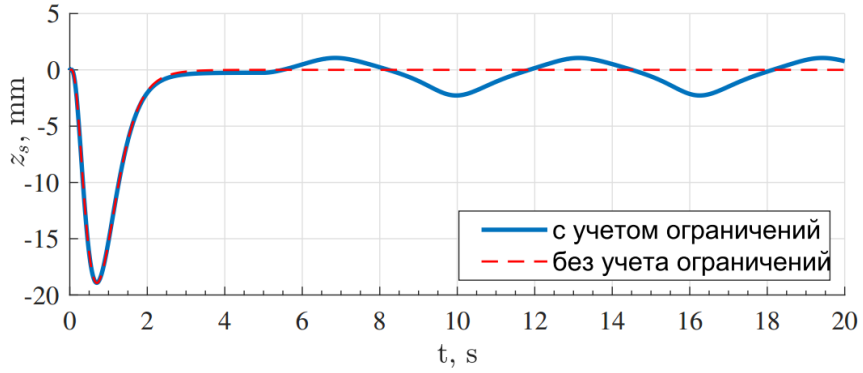


Рисунок 5 — Вертикальное перемещение подрессоренной массы при воздействии возмущения с параметрами ΔM = 20, A = 0,05

На рисунке 5 представлен график перемещения подрессоренной массы при воздействии возмущения с параметрами по п. 1 в случае использовании закона управления, учитывающего конструктивные ограничения и закона управления, синтезированного без их учета. Учет ограничений отклоняет систему от основной цели управления тем сильнее, чем ближе она (система) к заданному ограничению. Основываясь на результатах моделирования, можно сделать вывод, что в условиях отсутствия возмущающего воздействия ошибка позиционирования кузова составляет 0,25 мм, а при воздействии возмущающего воздействия – не более 2,25мм. Применительно к системам активной подвески подобного рода отклонения следует считать приемлемыми, т.к. основная задача системы это снижение ускорения.

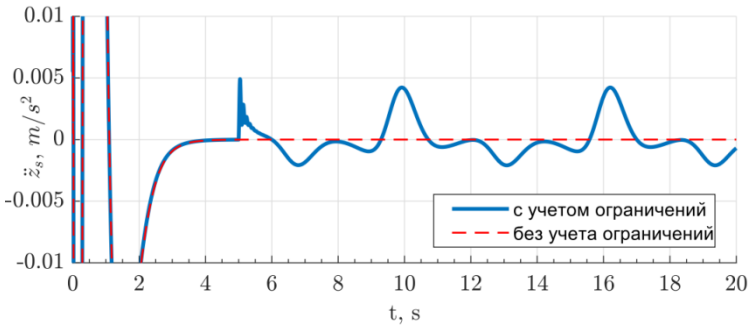


Рисунок 6 — Вертикальное перемещение подрессоренной массы при воздействии возмущения с параметрами ΔM = 20, A = 0,05

Согласно результатам, представленным на рисунке 6, учет ограничений приводит к незначительному ухудшению уровня изоляции подрессоренной массы от внешних возмущений, т.к. согласно ГОСТ 31391-2004 «Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка её воздействия на человека» среднее значение порога раздражения для линейных колебаний составляет 0,015 м/с^2, что значительно выше ускорения, полученного в результате компьютерного моделирования.

Результаты моделирования с параметрами по п. 1 показали, что предложенный закон управления обеспечивает стабилизацию подрессоренной массы вблизи заданного положения в условиях малых параметрических и внешних возмущений.

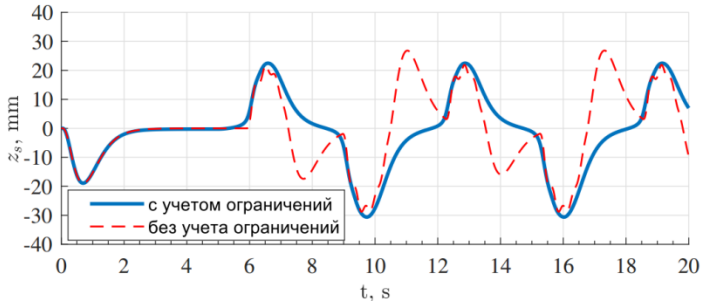


Рисунок 7 — Вертикальное перемещение подрессоренной массы при воздействии возмущения с параметрами ΔM = 20, A = 0,1

На рисунке 7 представлен график перемещения подрессоренной массы при воздействии возмущения с параметрами по п. 2. Согласно данным, представленным на рисунке 7 при воздействии значительных возмущений, возникают заметные колебания подрессоренной массы (≈ 3см).

Указанное перемещение подрессоренной массы обусловлено ограничением на перемещение поршня гидроцилиндра, что приводит к невозможности удержать кузов автомобиля в заданном положении. Рассмотрим график перемещения поршня гидроцилиндра, представленный на рисунке 8.

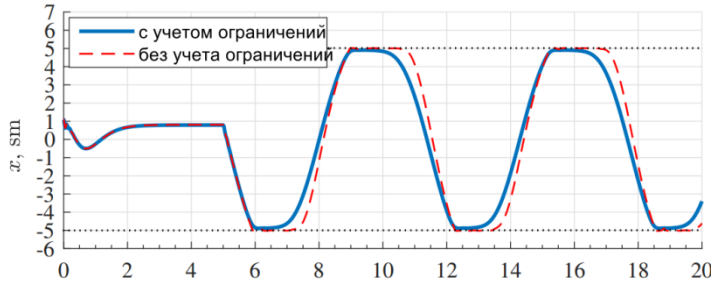


Рисунок 8 — Перемещение поршня гидроцилиндра при воздействии возмущения с параметрами ΔM = 20, A = 0,1

Как следует из данных, представленных на рисунке 8, при использовании регулятора, не учитывающего конструктивного ограничения на перемещение амортизатора, в процессе функционирования системы происходит удар поршня гидроцилиндра об упоры и как результат, возникает отклонение кузова от желаемого положения. Для регулятора, не имеющего данных о наличии ограничения, это является возмущением, которое он стремится компенсировать используя интегральное звено, что приводит к колебательному переходному процессу. В случае, если регулятор синтезирован с учетом конструктивных ограничений перемещение поршня гидроцилиндра не достигает своих пределов, что позволяет избежать удара и делает перемещение кузова более плавным.

Для подтверждения более плавного перемещении кузова рассмотрим график ускорения подрессоренной массы, представленный на рисунке 9.

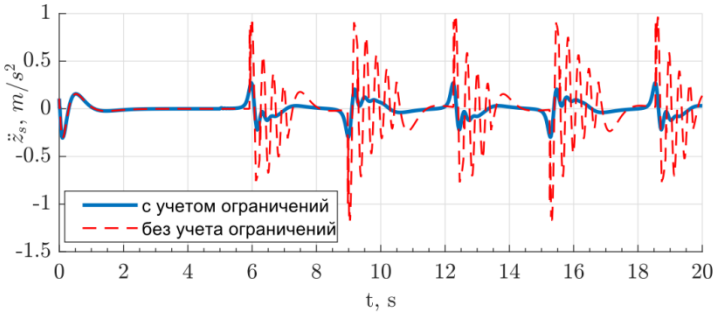


Рисунок 9 — Вертикальное ускорение подрессоренной массы при воздействии возмущения с параметрами ΔM = 20, A = 0,1

Результаты моделирования, представленные на рисунке 9 наглядно демонстрируют, что учет ограничений позволяет в значительной мере снизить ускорение кузова, а следовательно и нагрузку на элементы подвески.

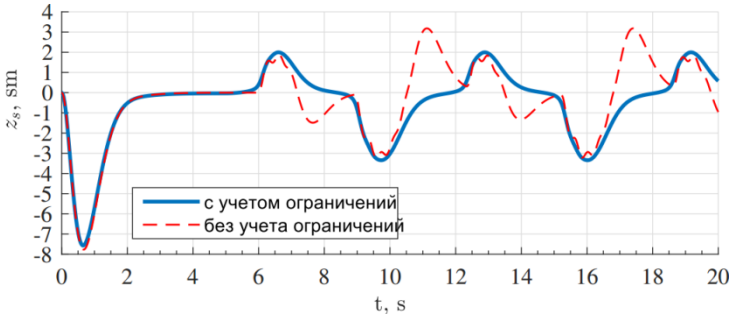


Рисунок 10 — Вертикальное ускорение подрессоренной массы при воздействии возмущения с параметрами ΔM = 80, A = 0,1

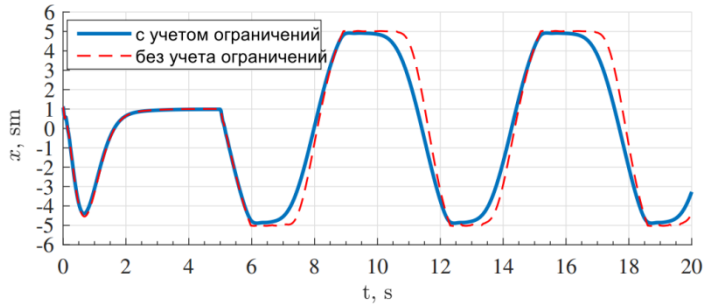


Рисунок 9 — Вертикальное ускорение подрессоренной массы при воздействии возмущения с параметрами ΔM = 80, A = 0,1

Для того чтобы убедиться в сохранении инвариантности введенного многообразия и, как следствие, конструктивных ограничений даже в условиях значительных параметрических неопределенностей, рассмотрим график перемещения подрессоренной массы, представленный

на рисунке 10 и график перемещения поршня гидроцилиндра, представленный на рисунке 11, при моделировании с параметрами по п. 3. Данные, приведенные на рисунках, 10–11 подтверждают, что в условиях значительных параметрических возмущений предлагаемый регулятор не теряет свойств, заложенных на этапе его проектирования.

Заключение

В рамках данной работы был создан закон управления, стабилизирующий положение подрессоренной массы в заданном положении и обеспечивающий функционирование системы в рамках конструктивных ограничений. Данный закон управления можно применить при реализации систем активной подвески в легковых и гоночных автомобилях. Существенной особенностью синтезированных алгоритмов управления является использование полной нелинейной модели активной подвески, которая содержит описание её кинематических элементов. Учет конструктивных особенностей, обеспечивает эффективное функционирование системы активной подвески в условиях действия кусочно-постоянных параметрических возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A road-adaptive LQC control for semi-active suspension systems / S. Hyun-Chul [et al.] // IFAC Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. — Cernobbio-Como, Italy, 2001.

2. Model predictive control of an air suspension system with damping multi-mode switching damper based on hybrid model / S. Xiaoqiang [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2017. — Vol. 94, no. 1.

3. Cronin, D. MacPherson Strut Kinematics / D. Cronin // Mechanism and Machine Theory. — 1981. — Vol. 16, no. 6.

4. Yves, A. Exact kinematics analysis of Cars suspension mechanisms using symbolic computation and interval analysis / A. Yves, M. Jean-Pierre, D. David // Mechanism and Machine Theory. — 2004. — Vol. 40, no. 1.

5. Blundell, M. Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics / M. Blundell, D. Harty. — Oxford : Elsevier, 2004. — 541 p.

6. Blkwill, J. Performance Vehicle Dynamics / J. Blkwill //. — Elsevier, 2018. — Chap. Suspension Kinematics.

7. Ylinen, A. A hydraulic cylinder model for multibody simulations / A. Ylinen, H. Marjamäki, J. Mäkinen. — 2014.

8. Korkmaz, F. Hydrospeicher als Energiespeicher / F. Korkmaz. — Berlin : Springer-Verlag, 1982.

9. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. — Москва : Энергоатомиздат, 1994. — 343 с.

II. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-166-169

Панчук Владимир Евгеньевич (1,5), Клочкова Валентина Георгиевна (1), Юшкин Максим Владимирович (1), Якопов Григорий Владимирович (1), Верич Юрий Борисович (1), Емельянов Эдуард Владимирович (1), Сачков Михаил Евгеньевич (2), Согоян Арутюн Эдикович (3), Марченко Данил Владимирович(4).

1. – Специальная астрофизическая обсерватория РАН
2. – Институт астрономии РАН
3. – National Instruments
4. – Северо-Кавказский федеральный университет
5. – Институт космических исследований РАН

О РАЗВИТИИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Аннотация. *Сообщается о разработках, выполненных по завершившейся теме «Перспективные методы спектроскопии с высоким разрешением». Оценивается возможность продолжения работ в рамках Программы развития САО на 2019-2023, в части обновления приборной базы САО. Сделаны предложения по комплексу средств поддержки наблюдений с высоким спектральным разрешением.*

Ключевые слова: *астрономическая спектроскопия высокого разрешения*

Обоснование

За последние 20 лет на БТА не появилось ни одного нового спектрографа высокого разрешения. Обещания коллег «…мы также обновим инструментальную базу для спектроскопических исследований…» - не выполнены. Поэтому оказалось необходимым пересмотреть программу развития спектроскопических наблюдений с высоким разрешением на БТА. Программой развития САО предусмотрено, в частности, что «Новые технологии, полученные в рамках реализации Программы, будут использованы в производстве высокотехнологичного научного оборудования для организаций, проводящих фундаментальные и прикладные исследования». Поэтому ниже мы упомянем и о разработках, пригодных для телескопов средних и малых диаметров.

Спектрографы

На основании опыта научной и технической эксплуатации Нэсмитовского эшелле спектрографа БТА (НЭС [1]) разработана и выполняется программа повышения потенциального качества (произведения RLN), с увеличением всех параметров (спектрального разрешения R, светосилы по потоку L и числа одновременно регистрируемых элементов спектра N) спектрографа [2]. В оценках параметров НЭС программа опирается на результаты численного моделирования спектральной аппаратуры наземного и космического базирования [3]. Основными элементами программы является переход на эшелле с полным (глубоким) штрихом, доукомплектование набора решеток скрещенной дисперсии, доукомплектование набора резателей изображения. Предполагается оснащение спектрографа анализатором линейной и круговой поляризации, разработанным И.Д.Найденовым. Сохраняются надежды на оснащение НЭС стационарно установленной матрицей ПЗС, взамен матрицы форматом 2Кх2К, в 2011г. вышедшей из строя вследствие неграмотной эксплуатации.

Вторым пунктом программы развития спектроскопии высокого разрешения на БТА является разработка эшелле-спектрополяриметра первичного фокуса ESPri [4-6]. Этот прибор является развитием схемы спектрографа PFES [7], с двукратным увеличением спектрального разрешения R, и четырехкратным увеличением числа одновременно передаваемых элементов спектра N. Такой выигрыш обусловлен уникальной оптической схемой: два элемента скрещенной дисперсии расположены по обе стороны коллимированного пучка, последнее позволило разместить достаточно габаритный прибор в кабине первичного фокуса.

Что касается методов сверхвысокого спектрального разрешения, то здесь мы рассматриваем две возможности: интерферометр в коллимированном пучке эшелле-спектрографа [8-10], и интерферометр с открытым входом [11]. В классе интерферометрических приборов вторая схема имеет преимущество в светосиле по потоку, но увеличенные габариты, последнее исключает её применение в кабине первичного фокуса БТА.

Для телескопов среднего диаметра разработан проект оптоволоконного эшелле-спектрополяриметра высокого разрешения EFES [12-15]. Этот прибор является развитием спектрографа UFES [16], изготовленного ранее, в ограниченные сроки, и при весьма ограниченных средствах. Спектрограф EFES рассматриваем как базовую модель для программы наземной поддержки [17-19] проекта Спектр-УФ [20].

В обзоре [21] на многочисленных примерах показано, что результативный доплеровский мониторинг звезд с экзопланетами нуждается в специализированном телескопе. Существующие многопрограммные телескопы РФ могут обеспечить лишь эпизодические наблюдения, с невысокой точностью и в случайное (т.е., заранее не привязанное к транзитным событиям) время. Поэтому в Программу развития САО мы предложили пункт "Разработка проекта автоматизированного оптического телескопа метрового класса для высокоточных доплеровских измерений". Стоимость такого телескопа (с минимальным полем зрения и минимальным центральным экранированием) сравнима со стоимостью собственно спектрографа высокого разрешения (оцениваемую по итогам разработки EFES). Ослабленным вариантом предлагаемого решения является использование одного из существующих 1-метровых телескопов, где центральное экранирование составляет заметную величину.

Эксплуатация спектрографов БТА требует высокой квалификации. Но известны случаи назначения ответственными исполнителями даже астрономов, еще не поступивших в аспирантуру. Зачастую на аппаратуре БТА молодой астроном тратит время на постижение основ спектроскопии, в ущерб тем профессионалам, которые при этом остаются вне рамок расписания наблюдений. Это, как правило, приводит к снижению качества получаемых спектров, иногда - к выходу аппаратуры из строя. Для нас очевидна необходимость обучения, подготовки, и аттестации спектроскопистов, причем до наблюдений на БТА. Учебные заведения, выпускающие астрономов, не оснащены спектрографами высокого (и даже среднего) разрешения, доступными для практических занятий. В лаборатории астроспектроскопии САО изготовлено несколько спектрографов, применимых на телескопах средних и малых диаметров. Эти проекты: кассегреновский эшелле спектрограф для телескопов диаметром 0.6м и 1.0м [22, 23], автоколлимационный кассегреновский спектрограф высокого разрешения для телескопов диаметром 0.25-0.4м [24], эшелле спектрограф для ньютоновского фокуса телескопа диаметром 0.25м [25] – разработаны и частично изготовлены (оптика и механика).

Средства поддержки

К средствам поддержки относим систему приборов и устройств, обеспечивающих работу спектрографов высокого разрешения, а также установок, изготавливаемых в учебных целях (лабораторные спектрографы и вышеперечисленные спектрографы малых телескопов).

При наблюдениях, выполняемых на спектрографе НЭС БТА (R=60000), величина одновременно регистрируемого диапазона составляет около 350 нм (в зависимости от средней длины волны и параметров узла скрещенной дисперсии). При анализе спектра методом моделей

атмосфер, кроме параметров отдельных спектральных линий, желательно иметь данные о распределении энергии во всем видимом диапазоне. На базе 70-сантиметрового общего гида БТА разработан эшелле-спектрофотометр среднего разрешения [26]. Оснащенный локальным корректором положения звезды, прибор позволит проводить абсолютные спектрофотометрические измерения одновременно с получением спектра высокого разрешения. Разработан метод интерферометрической калибровки шкалы длин волн звездных спектров, с использованием интерферометра Фабри-Перо в отраженном свете. По сравнению с использованием йодной абсорбционной ячейки [27], интерферометрический метод позволяет работать в расширенном диапазоне длин волн. Схема подготовки эмиссионного спектра калибровки, испытанная в системе управления оптоволоконным спектрографом EFES, будет использована и в спектрографе ESPri. Представления об эволюции позиционных характеристик спектрографов можно найти в [28].

Программой развития наблюдений с высоким спектральным разрешением предусмотрена «разработка средств адаптивной оптики для частичной компенсации атмосферных искажений и колебаний монтировки телескопа при проведении спектральных исследований в фокусах Нэсмита, создание локальных гидов для первичного фокуса». Здесь мы опираемся на 18-летний опыт эксплуатации и развития локального корректора фокуса Нэсмита БТА [29], и разработки локальных корректоров спектрофотометра БТА, эшелле-спектрополяриметра первичного фокуса ESPri и автогида оптоволоконного спектрографа EFES. В итоге будут усовершенствованы или принципиально изменены методы компенсации колебаний телескопа и атмосферной турбулентности.

Объединяющим элементом перечисленных разработок является унифицированный подход к проектированию, использование современной элементной базы электронных схем, применение современных технологий изготовления основных деталей и узлов.

Благодарности

Разработка эшелле-спектрополяриметра первичного фокуса ESPri поддержана Программой Президиума РАН №28 "Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей". Разработка метода интерферометрической калибровки в отраженном свете поддержана грантом Правительства Российской Федерации № 14.W03.31.0017. Работа по численному моделированию некоторых спектрографов поддержана проектом РФФИ № 19-07-01176.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Найденов И.Д. Оптический журнал. 2009. Т.76. №2. С.42.
2. Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin, M.V. Astronomy Reports, 2017. V.61. Iss.9. P.820.
3. Yushkin M.V., Fatkhullin T.A., Panchuk V.E. Astrophys. Bulletin. 2016. V.71. Iss.3. P.343.
4. Panchuk V., Yushkin M., Klochkova V., Sachkov M. Proc. SPIE. 2016. V.9908. id. 99086Y 6 pp.
5. В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова, М.В.Юшкин, и др. Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т.60. №1. С.53.
6. Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin M.V., et al. ASP Conference Series. 2017. V.510. P.562.
7. Panchuk V.E., Najdenov I.D., Klochkova V.G., et al. Bulletin of the Special Astrophysical Observatory. 1997. V. 44, P.127.

8. Panchuk V.E., Klochkova V.G., Sachkov M.E., Yushkin M.V. Solar System Research. 2015. V.49. Iss.6. P.420.
9. Panchuk V.E., Verich Yu.B., Klochkova V.G., et al. ASP Conference Series. 2017. V.510. P.566.
10. В.Е.Панчук, В.Г.Клочкова, Д.В.Марченко, и др. Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т.60. №8. С.753.
11. Kulagin E.S., Panchuk V.E. ASP Conference Series. 2017. V.510. P.556.
12. Panchuk V., Yushkin M., Klochkova V., et al. ASP Conference Series. 2015. V.494. P.334.
13. Panchuk V.E., Yushkin M.V., Klochkova V.G., et al. Astrophys. Bulletin. 2015. V.70. Iss.2. P.226.
14. Верич Ю.Б., Якопов Г.В., Юшкин М.В., Панчук В.Е. Международная конференция "Настоящее и будущее малых и средних телескопов" SMT-2015. Нижний Архыз, 19 - 22 октября 2015 г. Тезисы докладов. С.29-31.
15. Soghoyan H.E., Yakopov G.V., Verich Yu.B., et al. ASP Conference Series. 2017. V.510. P.554.
16. Panchuk V.E., Yushkin M.V., Yakopov M.V. Astrophys. Bulletin. 2011. V.66. Iss.3. P355.
17. Panchuk V., Sachkov M., Klochkova V. Proc. SPIE. 2018. V.10702. id. 107022R 5 pp.
18. Klochkova V.G., Panchuk V.E., Sachkov M. E. Proceedings of the 2018 acad. A.A. Boyarchuk Memorial Conference, INASAN Science Proceedings. Eds. D.V.Bisikalo and D.S.Wiebe. Moscow: Yanus-K. 2018. P.394.
19. Sachkov M., Panchuk V., Klochkova V., et al. Contr. of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 2019. V.49. No.2. P.142.
20. Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A. I. et al. ASP Conference Series. 2017. V.510. P.568.
21. https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.07.038597
22. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Сачков М.Е., и др. Международная конференция "Настоящее и будущее малых и средних телескопов" SMT-2015. Нижний Архыз, 19 - 22 октября 2015 г. Тезисы докладов. С.70.
23. Panchuk V.E., Verich Yu.B., Klochkova V.G. et al. ASP Conference Series. 2017. V.510. P.559.
24. Панчук В.Е., Верич Ю.Б. Международная конференция "Настоящее и будущее малых и средних телескопов" SMT-2015. Нижний Архыз, 19 - 22 октября 2015 г. Тезисы докладов. С.66.
25. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Комаров В.В., Марченко Д.В. Международная конференция "Настоящее и будущее малых и средних телескопов" SMT-2015. Нижний Архыз, 19 - 22 октября 2015 г. Тезисы докладов. С.69.
26. Panchuk V., Verich Y., Klochkova V., et al. ASP Conference Series. 2015. V.494. P.337.
27. Panchuk V.E., Nasonov D.S., Yushkin M.V. Astrophys. Bulletin. 2009. V.64. Iss.3. P.286.
28. Panchuk V.E., Klochkova V.G., Sachkov M.E. ASP Conference Series. 2019. ASPC. V.518. P.213.
29. Иванов А.А., Панчук В.Е., Шергин В.С. Препринт САО №155. 2001.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-170-175

Москвитин Александр Сергеевич, Комаров Владимир Владимирович,
Комарова Виктория Николаевна, Емельянов Эдуард Владимирович.

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА 1М ОПТИЧЕСКОМ ТЕЛЕСКОПЕ ЦЕЙСС-1000 САО РАН

Аннотация. *Приводятся сведения о работе штатных наблюдательных комплексов одного из основных телескопов САО РАН –1м оптического телескопа Цейсс-1000. А также сведения о последних разработках, связанных с модернизацией фотоприемников.*

Ключевые слова: *оптический телескоп, астрономические наблюдения*

Annotation. *The data on the work of regular observation complexes of one of the main SAO RAS telescopes – 1m optical telescope Zeiss-1000 are presented. As well as information on the latest developments related to the modernization of photodetectors.*

Keywords*: optical telescope, astronomical observations*

В статье [1] предыдущего сборника на примере одного из оптических телескопов САО РАН - Цейсс-1000 было показано аналитическое решение для определения оптимальных значений пространственно-временной дискретизации светоприемной аппаратуры. Там же было кратко дано описание 1м телескопа и его оборудования. В настоящей работе авторами приводятся более подробные сведения о работе штатных наблюдательных комплексов, а также о последних разработках, связанных с модернизацией фотоприемников.

С 1993 года на телескопе Цейсс-1000 появляется стационарное оборудование и, в основном, завершается создание наблюдательных методов. С этого времени начинается штатная работа телескопа с поквартальным, а затем и полугодичным планированием наблюдений. Цейсс-1000 становится многопрограммным инструментом, на котором проводятся наблюдения по трем десяткам программ [2] с помощью ПЗС-фотометра, куде-эшелле спектрометра, спекл-интерферометра, ПЗС-фотометра с внеосевым телегидом, 2-х канального поляриметра и 4-х канального электрофотометра. Основные наблюдательные программы: фотометрия ярких квазаров, близких сейфертовских и других галактик, рентгеновских двойных систем. Спектроскопия: мониторинг AGN, ярких сверхновых, двойных систем, магнитный обзор звезд главной последовательности, составление спектральных атласов ярких звезд Ae/Be Хербига, исследование переменности магнитных полей пекулярных звезд и др.

Ниже описываются основные наблюдательные методы, с помощью которых в настоящее время проводятся астрономические наблюдения на Цейсс-1000.

ПЗС-фотометр

Одним из первых основных приборов на Цейсс-1000 стал разработанный и изготовленный в САО ПЗС-фотометр, устанавливаемый в фокусе Кассегрена метрового телескопа (f=13.3) (рис.1). Он предназначен для получения прямых изображений астрономических объектов в полосах системы Джонсона-Коузинса: U, B, V, Rc, Ic, а также в интегральном свете без фильтра (3600 – 10000Å).

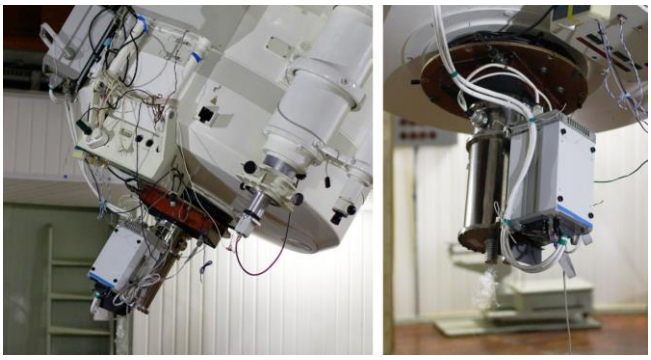


Рис.1. Общий вид ПЗС-фотометра в фокусе Кассегрена телескопа Цейсс-1000

Изображения звездообразных и протяженных объектов, полученные с помощью данного ПЗС-фотометра, позволяют рассчитать их точные положения (астрометрическую привязку) и геометрические характеристики, провести фотометрию в различных широких полосах спектра с целью изучения энергетических параметров, а также решить другие задачи. Множество однотипных измерений, представляющих собой кривую блеска, позволяют проследить динамику развития астрономических событий на временах от секунд до десятилетий, исследовать периоды в звездных и планетарных системах. Прямые изображения ощутимо дополняют другие имеющиеся данные об изучаемом объекте, позволяя сформировать цельную картину, необходимую для понимания происходящих физических процессов. Фотометр состоит из турели с 6 отверстиями для светофильтров и дискового затвора, помещенных в светозащитный корпус (рис.2). К нижней части крепится светоприемник с криостатом для охлаждения ПЗС-матрицы до температуры жидкого азота. Прибор позволяет дистанционно менять фильтры, управлять затвором и параметрами светоприемника, а также контролировать их состояние.

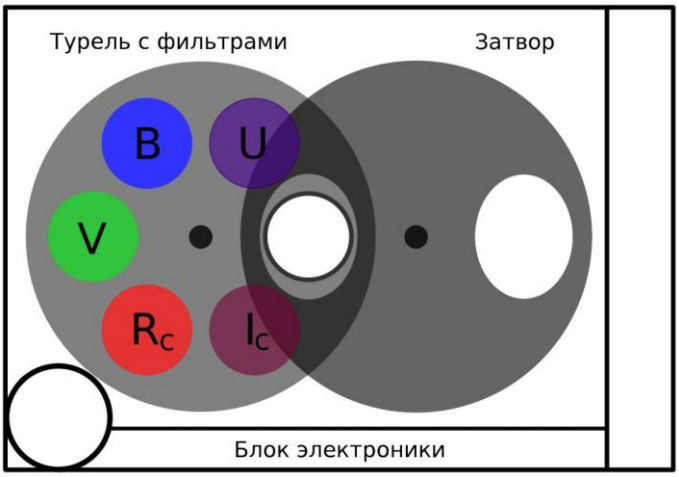


Рис.2. Принципиальная схема ПЗС-фотометра

В качестве светоприемника используется ПЗС-матрица EEV 4240 формата 2048x2048 пикселей с максимальной квантовой эффективностью 82% (на длине волны 4500Å) [3]. Пропускание фотометра в различных фильтрах показано на рис.3. Оценка точности определения звездных величин показана на рис.4. Характеристики фотометра в сочетании с используемой ПЗС-системой приведены в таблице 1. Для ПЗС-матрицы EEV 4240 в красных фильтрах (Rc, Ic) характерно появление интерференционного узора (fringes). Удаление этой компоненты подразумевает получение серии кадров с небольшими смещениями около 20". Суммарный кадр при этом будет иметь меньшую площадь, чем отдельные кадры. Ввиду инертности затвора экспозиции короче 10с обычно не используются. Это обеспечивает уровень однородностей по полю более 99.7%. Реально используемое максимальное время отдельных экспозиций составляет 600 с. Предельная звездная величина регистрируемых объектов (проницание) в фильтре Rc

достигает: $20^m.3$ за 300 с при качестве изображений (seeing) 2"; $22^m.7$ за 3 ч суммарной экспозиции при качестве изображений 1".8. Звездные величины приведены в системе Веги. Методика наблюдений на ПЗС-фотометре телескопа Цейсс-1000 включает этапы предварительной подготовки списка объектов, получения калибровочных кадров (электронного нуля, плоского поля, темнового тока, если это необходимо), наблюдения научных объектов, а также стандартных звезд для калибровки по абсолютным потокам. Обработка данных производится по стандартным алгоритмам в программных пакетах IRAF, ESO-MIDAS и аналогичных.

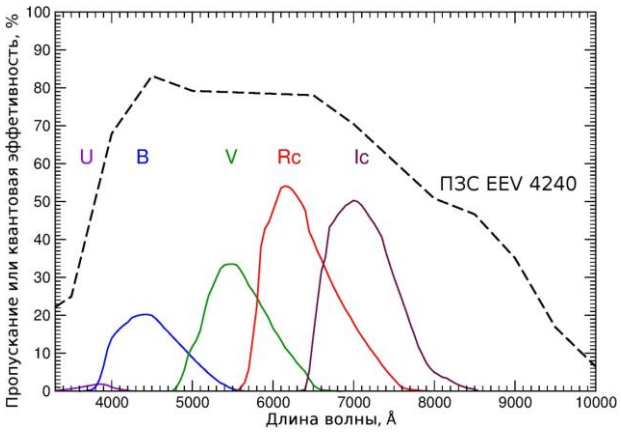


Рис.3. Квантовая эффективность ПЗС EEV 4240 и ожидаемое пропускание системы (телескоп + ПЗС + фильтр) для полос U, B, V, Rc, Ic

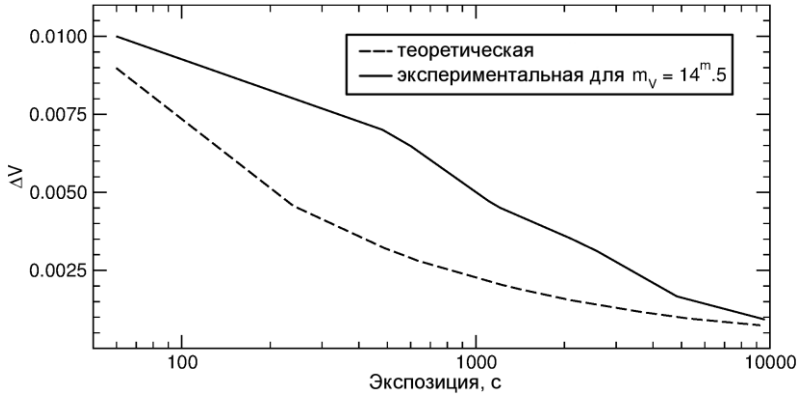


Рис.4. Графики теоретической и экспериментальной точности регистрации в зависимости от времени накопления для ПЗС-фотометра. Данные приведены для звездообразного объекта $14^m.5$ величины в фильтре V [4]

Таблица 1 Характеристики ПЗС-фотометра телескопа Цейсс-1000

Формат кадра ПЗС EEV 42-40	2048x2048 пикселей
Поле зрения	7'.3 x 7'.3
Масштаб (без бинирования)	0".216/пиксель
Фотометрическая система и спектральный диапазон	Широкополосные фильтры Джонсона-Коузинса U, B, V, Rc, Ic, (3600-10000 Å)
Коэффициенты усиления: Gain (low) Gain (high)	 2.02 e-/ADU 0.50 e-/ADU

Шум считывания Read-out Noise (режим normal)	3.3e-
Времена экспозиций отдельных кадров	10-600 с
Проницание (предел 3σ): U, 300 с, seeing = 1".5 B, 300 с, seeing = 2".0 V, 300 с, seeing = 1".8 Rc, 300 с, seeing = 2".0 Ic, 300 с, seeing = 1".6 Rc, 3 ч, seeing = 1".8	 20m.3 21m.0 20m.3 20m.3 19m.4 22m.7

Куде-эшелле-спектрометр CEGS

В связи с активным внедрением ПЗС-матриц в САО РАН в эти же годы на телескопе Цейсс-1000 разрабатывается новый прибор на базе куде-спектрографа: эшелле-спектрометр CEGS (Coude Echelle/Grating Spectrometer) [5] для решения задач в области астроспектроскопии с высоким и сверхвысоким разрешением. Данный прибор становится основным для спектроскопических наблюдений в фокусе куде. 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 проводились наблюдения с фотоприемником на базе ПЗС-матрицы 580x520 пиксел, с размером пикселя 24мкм. Диаметр коллимированного пучка составляет 165 мм. Камера Шмидта (с выносом фокуса) имеет фокусное расстояние 350 мм. В качестве элемента кросс-дисперсии использованы две призмы с углами преломления 45 град., изготовленные из стекла ЛК8 и собранные в едином блоке. Сбор информации осуществлялся тогда с помощью ПК IBM PC IT/386.

Набор дифракционных решеток (табл.2) позволяет работать в нескольких режимах наблюдений: высокой, средней, умеренной и низкой дисперсии.

Таблица 2 Параметры дифракционных решеток эшелле-спектрометра CEGS

Тип решетки	Размер, мм	Угол блеска, град.	штр/мм
G37.5	200x300	63.5	37.5
G75	200x300	63.5	75
G600-1	200x200	24	600
G600-2	200x200	8	600

При этом решетки располагаются на единой каретке, которая позволяет проводить их быструю смену. Для высокодисперсионного метода наблюдений используются дифракционные решетки $G_{37.5}$ и G_{75}, предназначенные для работы в высоких порядках (N ÷ 50-100). При проведении спектрофото-метрических исследований обычно используется эшелле-решетка 37.5 штр/мм. Она позволяет регистрировать одновременно до 60-70 перекрывающихся по длинам волн эшелле-порядков и для звезд спектрального класса A0-F0_одновременно регистрировать излучение до 9000 А. При проведении магнитных измерений обычно используется эшелле-решетка 75 штр/мм, дающая вдвое большее угловое разведение между порядками и таким образом позволяющая проводить наблюдения с анализатором циркулярной поляризации, т.е. регистрировать зеемановские спектры. Обратная линейная дисперсия составляет в среднем 4 А/мм. При этом регистрируются одновременно до 30-35 не перекрывающихся по длинам порядков.

Для варианта наблюдений средней дисперсии используется дифракционная решетка G_{600-1}, обеспечивающая обратную линейную дисперсию 21 А/мм на втором порядке и 14 А/мм на третьем порядке. Оба порядка регистрируются одновременно.

Режим работы умеренной дисперсии использует дифракционную эшелле-решетку G_{600-2}, обеспечивающую обратную линейную дисперсию 50 А/мм. В данном методе наблюдений в качестве основного диспергирующего элемента используется призма, обеспечивающая обратную линейную дисперсию 150 А/мм в районе линии Н.

В последнее время наблюдения проводятся только в двух режимах: высокой и средней дисперсии. Для обоих вариантов ($G_{37.5}$ и G_{75}) предельная звездная величина в хорошую погоду для часовой экспозиции равна примерно 7^m. В дальнейшем, ПЗС-камера была заменена на EEV 4240 с охлаждением жидким азотом, которая описана в разделе ПЗС-фотометр. В настоящее время эшелле-спектрометр CEGS работает с новой ПЗС-камерой Apogee Aspen CG16M [6].

Спектрограф UAGS

Для реализации метода получения спектров протяженных астрономических объектов в диапазоне длин волн 360-1000 нм и средним спектральным разрешением используется Универсальный астрономический дифракционный спектрограф с длинной щелью (UAGS) телескопа Цейсс-1000. Спектрограф является модернизированным сотрудниками обсерватории вариантом стандартного UAGS [7], выпускавшегося фирмой Carl Zeiss (Jena) для фотографической спектроскопии небесных объектов. Спектрограф устанавливается в фокусе Кассегрена телескопа. Для получения спектров используются дифракционные решетки R325, R400, R1302, параметры которых приведены в таблице 3. Регистрация спектра осуществляется с помощью ПЗС приемника (EEV 4240, 2048x2048, 13.5x13.5мкм), установленного на Шмидт-Кассегрен камеру (F=150mm). Спектры получаются без бинирования в режиме (high, norm), что соответствует дискретизации отсчетов 0.52e/ADU, шуму считывания около 2e и масштабу вдоль щели 1.35"/px.

Для калибровки спектра в длинах волн используется источник линейчатого спектра He+Ne+Ar. Выставление объекта в щели спектрографа и гидирование (по офсетной звезде) осуществляется по изображению окружающего объект поля размером 5x4 угловых минут.

Таблица 3Параметры дифракционных решеток

Название решеток	штрих/мм	Спектральный диапазон	Дисперсия	Спектральное разрешение
		[A]	[A/px]	[A]
R325	325	3700-7500	2.5	7.5
R400	400	3600-8000	2.1	6.3
R1302 (fi=43d10')	1302	3880-6300	0.5	1.5
R1302 (fi=53d)	1302	5750-7050	0.7	2.1

Модернизация фотоприемников

С 2013 года телескоп Цейсс-1000 выходит на новый уровень наблюдений: создается автоматизированная система управления [8] с одновременной модернизацией целого ряда основных узлов телескопа. С 2018 года на телескопе САО РАН Цейсс-1000 проводятся технические испытания многорежимного фотометра-поляриметра (Multi-Mode Photometer-Polarimeter, MMPP) [9]. Прибор устанавливается в фокуссе Кассегрена и комплектуется камерой Eagle-V с жидкостным охлаждением (до -100 град.С). Две турели по пять позиций могут использоваться с высокоэффективными интерференционными фильтрами широкополосной

системы Джонсона-Коузинса (диаметром 50-мм, производства Astrodon), а также с более узкополосными фильтрами, центрированными на основные эмиссионные линии изучаемых объектов. В поляриметрическом режиме имеется возможность изучения линейной и круговой поляризации. По сравнению со стеклянными фильтрами, применяемыми в ПЗС-фотометре, интерференционные дают заметное увеличение эффективности наблюдений, а сочетание нескольких методик в одном приборе делает ММРР современным инструментом для решения широкого круга фотометрических и поляриметрических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В.В. Параметрический синтез наблюдательных систем // Труды VIII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». Нижний Архыз. 2017. С. 150-156.

2. Комаров В.В. Фотоприемные устройства 1 м оптического телескопа САО РАН // Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва. 2016. С. 448-451.

3. Мурзин В.А., Маркелов С.В., Ардиланов В.И., Афанасьева И.В., Борисенко А.Н.,Иващенко 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.

4. Валеев А.Ф., Антонюк К.А., Пить Н.В., Соловьев В.Я., Бурлакова Т.Е. и др. Обнаружение регулярной малоамплитудной фотометрической переменности магнитного белого карлика WD0009+501. О возможности фотометрического исследования экзопланет на базе телескопов метрового класса Специальной и Крымской астрофизических обсерваторий. //Астрофизический Бюллетень. 2015. т. 70. №3. С. 336-346.

5. Мусаев Ф.А. Эшшеле-спектрометр фокуса куде 1-м телескопа САО РАН. //ПАЖ. 1996. т. 22. №10. С. 795-800.

6. Комаров В.В., Семенко Е.А. Исследование современных полупрофессиональных ПЗС-камер для работы на оптических телескопах среднего класса // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. №7(201). С. 32-46.

7. Shapovalova A.I., Popovic L. C., Collin S., Burenkov A.N. et. al. Long-term variability of the optical spectra of NGC 4151: I. Light curves and flux correlations. // A&A. 2008. v. 486. p. 99-112.

8. Драбек С.В., Комаров В.В., Потанин С.А., Саввин А.Д., Москвитин А.С., Спиридонова О.И. Исследование качества оптической системы телескопа Цейсс-1000 с помощью датчика волнового фронта Шака-Гартмана//Астрофизический бюллетень. 2017. т. 72. № 2. С. 227-238

9. Емельянов Э. В. ММРР -- multi-mode photometer-polarimeter. Оптическая схема и система управления прибором // Труды 9-ой Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». Нижний Архыз. 2019. (см. настоящий сборник).

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-176-180

Панчук Владимир Евгеньевич, Клочкова Валентина Георгиевна

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

К ПРОБЛЕМЕ НАЗЕМНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ВЫСОКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Аннотация.*Основываясь на многолетнем опыте: а) работы в Специальной Астрофизической Обсерватории (САО), б) взаимодействия с оптико-механической промышленностью, в) сотрудничества с рядом зарубежных научных организаций, - авторы излагают свою точку зрения на проблему организации (или самоорганизации) одного из направлений, составляющих основу современной астрофизики.*

Ключевые слова: *организация науки, астрономическая спектроскопия*

Проблема в целом

В течение десятилетий в отечественной практике сохраняется тенденция создания универсальных астрономических наземных телескопов. В случае эксплуатации многопрограммного 6-метрового телескопа БТА это растягивает сроки выполнения любых научных программ [1] и создает специфические условия эксплуатации и развития навесной аппаратуры (фотометров, спектрографов). Обновление навесной аппаратуры происходит с минимальным участием оптико-механической промышленности. В этих условиях определяющую роль играют те астрономы, которые не только заинтересованы в поддержании техники наблюдений на мировом уровне, но и способны организовать процесс развития соответствующей аппаратуры и методов. Ввиду малочисленности популяции специалистов по астрономическому приборостроению, развитие, если и идёт, то не всегда предсказуемо.

Три поколения аппаратуры БТА, ориентированной на спектроскопию звезд, различаются не только типом используемых светоприемников, но и возрастающей ролью инженерного обеспечения наблюдений. Начиная с применения двумерных телевизионных систем счета фотонов [2], астрономические наблюдения на БТА превратились в уникальные научно-технические эксперименты, низведенные сегодня до статуса "предоставление услуг... на безвозмездной основе", (см. [3] , раздел 6). Такое различие, как в определениях, так и по сути, - уже приводит к ощутимым последствиям в планировании, финансировании, и квалификационных оценках.

Третьим фактором, определяющим хаотическое развитие с признаками самоорганизации, является различие в уровне оснащенности отечественных наземных телескопов. Это отражается и на квалификации внешних заявителей, подающих предложения по использованию аппаратуры БТА. В итоге на БТА попадает заметная доля невыполнимых программ, или, наоборот, программ, выполнимых на средних телескопах (см. [1], а также [4]). Кроме того, часть наблюдений на БТА выполняется сотрудниками, не аттестованными как астрономы-наблюдатели. Здесь одним из решений является программа оснащения телескопов средних и малых диаметров современными спектрографами, пригодными как для исследовательских программ, так и для подготовки спектроскопистов. Для распространения технологий, разработанных на БТА, существенным является вопрос подготовки специалистов по проектированию и эксплуатации навесной аппаратуры. Меры, предпринятые в текущем десятилетии [5], пока не дают притока необходимых специалистов. Современное астрономическое приборостроение находится в категории междисциплинарной, где необходимы знания и практический опыт в оптике, материаловедении, электронике, программировании,

практической астрофизике и физике атмосферы. Такого набора знаний и навыков не получают ни в одном высшем учебном заведении.

Объединению усилий столичных и региональных научно-технических учреждений в значительной степени препятствует новая политика нормировки заработной платы научных работников на среднюю заработную плату бюджетников по региону. Напомним, что большинство астрономических обсерваторий и наблюдательных баз были организованы (по соображениям оптимального астроклимата), в регионах со слабой промышленной структурой. Это, кроме "ножниц" в сегодняшней оплате труда (в столицах, промышленных центрах, и в депрессивных регионах), определило постоянную проблему укомплектования эксплуатационных подразделений обсерваторий инженерными кадрами.

И, наконец, возрастает доля заявленных перспективных проектов, неосуществимых (как в отведенное время, так и в принципе), по причинам научно-организационного, кадрового и финансового характера. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить перспективные программы развития астрономических учреждений и архивы годовых отчетов (на примере САО это [6] и [7], соответственно). Аналитическое обеспечение таких проектов формализовано или отсутствует. Взаимодействие с масс-медиа (интервью, публикации, экскурсии, шумовые эффекты в блогосфере) - чаще приводит к репутационным и, затем, финансовым потерям, чем к продуктивной пропаганде научных достижений.

Проблема в частности

Что касается спектроскопии высокого разрешения (далее - СВР), то здесь ситуация ещё хуже. Перечислим пять причин, которые считаем основными.

Во-первых, ряд новых (и поэтому ажиотажных) астрофизических направлений подпитывается информацией из спектральных диапазонов, где высокое разрешение если и будет достигнуто, то в отдаленном будущем. В этих направлениях исследователи ограничиваются сопровождением программ оптическими наблюдениями со средним разрешением.

Во-вторых, СВР в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне предоставляет объемы информации, на два-три порядка (!) превосходящие возможности спектроскопии среднего и низкого разрешения. Время полной переработки такой информации, анализа и опубликования результата, - сравнимо и даже превосходит характерные времена, определяемые современными "правилами игры": время продолжительности гранта, время обучения в аспирантуре, время смены наукометрических критериев, время очередных реформ в науке, и т.д. Соответственно, время подготовки профессиональных спектроскопистов увеличивается в разы (по сравнению с подготовкой для других видов астрономических наблюдений).

В-третьих, наблюдения с высоким спектральным разрешением на больших телескопах всюду рассматриваются как деятельность второго приоритета, по сравнению с наблюдениями со средним спектральным разрешением. Дело в том, что спектральное разрешение дифракционного спектрографа R обратно пропорционально диаметру телескопа D и угловым размерам входной щели s, и прямо пропорционально диаметру коллимированного пучка d. На больших телескопах давно достигнуты технологические пределы размеров дифракционных решеток, d=300мм [8], но потери света на входе спектрографа по-прежнему велики (снижаются средствами адаптивной оптики или за счет снижения одновременно регистрируемого участка спектра – путем применения резателей изображения [9]). В методах СВР светосила по потоку L растет пропорционально диаметру зеркала, тогда как в наблюдениях с низким спектральным разрешением - пропорционально квадрату диаметра D. Второстепенный статус СВР на больших телескопах удерживается за счет наличия у Земли естественного спутника - в лунные ночи большинство программ, выполняемых со средним и низким разрешением, неэффективны из-за неопределенностей, возникающих при учете фона неба.

В-четвертых, стоимость спектрографа высокого разрешения пропорциональна третьей степени диаметра коллимированного пучка. Такие спектрографы больших телескопов являются

наиболее сложными экспериментальными установками оптического диапазона, при создании которых требуются усилия большого коллектива и устойчивое финансирование, минимум на пятилетней шкале. Отечественная практика показала, что эти условия необходимы, но не достаточны (пример см. в [10] и [11]).

В-пятых, не следует сбрасывать со счетов проблему коллегиальности в принятии решений. Число публикующихся отечественных спектроскопистов невелико, их роль в формировании новых требований к аппаратуре БТА малозаметна, поэтому в области методов СВР вся инициатива исходит только от САО. По этой инициативе Научный совет РАН по астрономии (секция №10 "Оптические телескопы и методы") в 2001 году принял решение об оснащении БТА широкодиапазонным (λλ=0.3-1мкм) спектрографом с разрешением до R=100000. Было подготовлено два аванпроекта [12], [13], и в 2011 году принят окончательный выбор проекта (без конкурсной процедуры, подробнее см. в [14]). За это время в мировой практике СВР произошли кардинальные изменения (см. [15], которые на политике оснащения БТА аппаратурой СВР никак не отразились.

Немного истории

В исторических экскурсах [16], [14] мы попытались объяснить, почему получилось так, а не иначе. Здесь только отметим основные моменты.

В конце 60-х и начале 70-х отечественной оптической промышленности был заказан первый комплект спектральной аппаратуры для БТА (ОЗСП [17], СП-124 [18], СП-160 [19], СП-161[20]). Оснащение БТА этими спектрографами было завершено к 1977 году. Ни один из этих спектрографов не обеспечивал качественных наблюдений с высоким спектральным разрешением, R>30000 (особенности эксплуатации ОЗСП и СП-124 см. в [21], [22]).

Второй этап развития СВР мы связываем с применением двумерных счетчиков фотонов на ОЗСП и первых спектрографах со скрещенной дисперсией, изготовленных в лаборатории астроспектроскопии САО. Здесь основной проблемой являлась нежесткость светоприемника (поведение четырехкаскадного ЭОП с магнитной фокусировкой при различной ориентации относительно магнитного поля Земли), в сочетании с низким динамическим диапазоном счетчика фотонов. Эксплуатация осложнялась особенностями инженерного обеспечения и недостачей носителей накопленной информации. В результате работ второй половины 80-х была сформулирована концепция астроспектроскопии на БТА [23]. В основу концепции были положены опыт наблюдений на многопрограммном телескопе и определение потенциального качества спектрографа.

Начало третьего этапа (с использованием матриц ПЗС, [24]), оказалось более успешным, что позволило нам в 1993г. сформулировать программу перевода методов СВР на коллимированные пучки большого диаметра. В 1997г. был построен спектрограф НЭС [25], [26], d=240-270мм, а на рубеже столетий спектрограф ОЗСП был переведен на полное использование коллимированного пучка, d=258мм [22]. На 1-метровом телескопе САО эта программа была отклонена, что оставило методы высокого разрешения чисто декларативными (длиннофокусные камеры практически не используются). В 90-е годы обсерватория не могла себе позволить гармоничное развитие, и расходы были преимущественно на светоприемники. Для БТА не было сделано ни одного крупного оптического заказа в промышленности. Спектральная аппаратура третьего поколения (этапа), ориентированная на матрицы ПЗС, также изготовлена в условиях САО. Основную долю крупных оптических элементов составляло наследство 2-го и даже 1-го этапов.

В начале века В.Л.Афанасьевым и В.Е.Панчуком была предложена программа "5x5x5" - т.е. за 5% бюджета ежегодно, за 5 лет повысить эффективность спектральной аппаратуры БТА в 5 раз (по инварианту RxLxN, где N - число одновременно регистрируемых элементов спектра). Предложения не были поддержаны, и начался период работы наших спектроскопистов "на стороне", заключавшийся в разработке спектрографов для телескопов меньших диаметров (от

0.6м до 2.4м), включая космический проект [27]. В 2018 году темы плана НИР САО по разработке методов спектроскопии высокого и среднего разрешения закрыты, но некоторые пункты этих тем внесены в соответствующие астрофизические темы.

Выводы

Возвращаясь к теме конференции, мы считаем доказанным, что развитие СВР в САО относится к явлениям и процессам в сложных неравновесных системах. Следует признать, что в критических пунктах нам не удалось управлять этим процессом. Всё же укажем на некоторые очевидные ошибки развития (соответствующие количественные показатели у авторов имеются).

1) Политика грантов, действующих на шкале 3-5 лет, не способствует созданию новых приборов и методов наблюдений. Размер финансирования не является основным критерием, и здесь у САО уже имеется отрицательный опыт. Обещать результаты, заведомо невыполнимые на короткой шкале, типа - "В рамках проекта мы также обновим инструментальную базу для спектроскопических исследований в крупнейшей российской обсерватории САО РАН. ... Создание и запуск общедоступных инструментальных проектов для БТА является одной из наших целей...", или "По окончанию проекта исследования экзопланет нами будет существенно обновлен список открытых экзопланет и экзопланет в зонах обитаемости" – означает подрывать репутацию не только заявителей, но и всего учреждения. Обсерватории необходимо принять реалистичную программу развития, не зависящую от внешних случайностей.

2) Взаимодействие с предприятиями оптико-механической промышленности является сегодня занятием рискованным. Курирование таких разработок назначенными авторитетами, которые не имели достаточный опыт работы на «уникальной научной установке» БТА, привело к большим ресурсным (время, люди, деньги), и репутационным потерям. Необходимо учитывать не только новые идеи, но и возможности их реализации в нашей стране (включая кадровое обеспечение).

3) Тезис "дорогу молодым", возникший из желания удержать молодых специалистов в РФ, является разнообразно трактуемым и поэтому порождающим неустойчивость. Этот тезис слабо работает в области разработки высокотехнологичных методов, к которым относим СВР. За всю историю САО (создание временных молодежных коллективов; деятельность советов молодых ученых, с обязательным включением представителя в ученый совет; конкурсы молодежных работ, оцениваемых с пониженными критериями; и т.п.), трудно вспомнить научно-технические работы, реально выполненные без участия научных руководителей. Коллегам, выборочно ссылающимся на западные формы и условия научной работы, напомним, что там поддержка и карьерное продвижение ученых выполняется без возрастной дифференциации.

4) Наукометрические критерии, (предлагаемые не работающими в науке людьми, но желающими управлять), в области приборостроения не являются объективными. Более того, в отечественном астрономическом сообществе практикуется осознанное игнорирование авторства некоторых используемых разработок. Расширяется практика заимствования идей без ссылок.

5) Будущее СВР на БТА мы связываем с развитием методов адаптивной оптики. Все остальные ресурсы экономии света в схеме классического дифракционного спектрографа уже выбраны. С этой точки зрения проекты, рассчитанные на использование первичного фокуса, не приведут к существенному выигрышу в светосиле по потоку L. Дело в том, что объем кабины первичного фокуса БТА (подвижной по двум координатам), недостаточен для размещения схемы адаптивной оптики, устанавливаемой перед входом в спектрограф.

6) Задачи спектроскопического исследования внесолнечных планет, сегодня являющиеся в мире «локомотивом» разработок аппаратуры СВР нового поколения, требуют, прежде всего, привлечения спектроскопистов высшей квалификации. Комплексный анализ проблемы можно найти в [28].

Наши результаты и ближайшие планы в области СВР публикуем отдельно (настоящий сборник).

Благодарности

Исследования с использованием СВР, выполненные на БТА в 2018-2019 гг., частично поддержаны проектом РФФИ 18-02-00029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panchuk V.E. Bulletin of the Special Astrophysical Observatory. 1997. V.44. P.65.
2. Афанасьев В.Л. и др., в сб. "Техника средств связи", Серия "Техника телевидения" 1987. Вып.5. С.13.
3. https://www.sao.ru/Doc-k8/CKPUNU/Docs/Polozhenie_UNU_BTA.pdf
4. https://www.sao.ru/request/schedule/index.html
5. http://edu.ifmo.ru/subspec/8492/
6. https://www.sao.ru/Doc-k8/CKPUNU/Docs/Programma_razv_2016-2020.pdf
7. https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/results/ar_facil/
8. Vogt S.S., Allen S.L., Bigelow B.C. et al. Proc. SPIE. 1994. V.2198. P.362.
9. Naidenov I.D., Panchuk V.E., Yushkin M.V. 2007. V.62, Iss.3, P.296.
10. Valyavin G.G., Bychkov V.D., Yushkin, M.V. et al. Astrophysical Bulletin, 2014. V.69. Iss.2. P.224.
11. Valyavin G.G., Musaev F.A., Perkov A.V., et al. ASP Conference Series. 2019. V.518. p.242.
12. Валявин Г.Г., Галазутдинов Г.А., Кудрявцев Д.О., Драбек С.В. Оптоволоконный спектрограф-поляриметр БТА (проект). Н.Архыз. 2003. 48с.
13. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В. Спектроскопия звёзд на БТА: проблемы развития. В сб. "Методы спектроскопии в современной астрофизике". М.: "Янус-К", 2007. с.166.
14. Панчук В.Е., Клочкова В.Г. 40 лет спектроскопии высокого разрешения на БТА. Юбилейный сборник "САО РАН - 50 лет" Нижний Архыз. 2018. с.49.
15. Panchuk, V.E., Klochkova, V.G. ASP Conference Series. 2019. V.518. P.237.
16. Панчук В.Е., Клочкова В.Г. 30 лет работы БТА: спектроскопия высокого разрешения. Юбилейный сборник "САО РАН - 40 лет" Нижний Архыз. 2006. с.32.
17. Васильев А.С., Евзеров А.М., Лобачев М.В., Пейсахсон И.В., Оптико-механич. промышл. 1977. Вып.2. С.31.
18. Гусев О.Н., Зандин Н.Г., Лобачев М.В., Оптико-механич. промышл. 1976. Вып.12. С.63.
19. Зандин Н.Г., Колесников А.Е., Пейсахсон И.В., Лобачев М.В. Оптико-механич. промышл. 1977. Вып.2. С.34.
20. Зандин Н.Г., Гусев О.Н., Пейсахсон И.В., Оптико-механич. промышл. 1977. Вып.6. С.20.
21. Klochkova V.G., Panchuk V.E., Yushkin M.V., Nasonov D.S. Astrophysical Bulletin. 2008. V.63. Iss.4. P.386.
22. Panchuk V.E., Chuntonov, G.A., Naidenov I.D. Astrophysical Bulletin. 2014. V.69. Iss.3. P.339.
23. Klochkova V.G., Panchuk, V.E. Bulletin Special Astrophysical Observatory. 1991. V.33. P.1.
24. Panchuk V.E., Klochkova V.G. ASP Conference Series. 1996. V.108. P.291.
25. Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Найденов И.Д. Оптический журнал. 2009. Т.76. №2. С.42.
26. Panchuk V.E., Klochkova V.G., Yushkin, M.V. Astronomy Reports. 2017. V.61. Iss.9. P.820.
27. Panchuk V., Yushkin M., Fatkhullin T., Sachkov, M. Astrophysics and Space Science, 2014. V.354. Iss.1. P.163.
28. https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.07.038597

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-181-188

Комаров Владимир Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН)

ИНЖЕНЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПАХ САО РАН

Аннотация. *В данной работе рассматриваются вопросы разработки систем для обеспечения астрономических наблюдений на крупнейших российских оптических телескопах САО РАН: БТА диаметром 6м и Цейсс-1000 диаметром 1м. Предлагается методика оптимизации параметров таких систем, которая позволяет определить их оптимальные параметры.*

Ключевые слова: *оптический телескоп, наблюдательная система*

Annotation. *This paper deals with the development of systems for providing astronomical observations on the largest Russian optical telescopes of the Special Astrophysical Observatory: BTA with a diameter of 6 m and Zeiss-1000 with a diameter of 1 m. A technique is proposed for optimizing the parameters of such systems, which allows us to determine their optimal parameters.*

Keywords: *an optical telescope, an observation system*

Инженерное обеспечение астрономических наблюдений на оптических телескопах Специальной астрофизической обсерватории РАН осуществляет группа инженерного обеспечения наблюдений, входящая в лабораторию обеспечения наблюдений САО РАН. Основные инструменты обсерватории: оптический телескоп БТА (Большой Телескоп Азимутальный) с диаметром главного зеркала 6м и радиотелескоп РАТАН-600 (РадиоТелескоп Академии Наук) с кольцевой многоэлементной антенной диаметром 600 м. Наряду с большим оптическим телескопом БТА в САО работают 2 малых телескопа, которые расположены вблизи БТА. Это Цейсс-1000 – оптический телескоп с диаметром главного зеркала 1м и Цейсс-600 – оптический телескоп с диаметром главного зеркала 60см. Оба телескопа являются собственностью САО, обслуживаются сотрудниками САО и их работа финансируется из бюджета обсерватории. Цейсс-1000 введен в эксплуатацию в 1990 году [1]. Начиная с 1993 года, когда на телескопе появилось стационарное оборудование и было в основном завершено создание наблюдательных методов, введено по-квартальное, а затем и полугодичное планирование наблюдений. Цейсс-600 был восстановлен в 1994 году после его транспортировки с площадки астрономической станции КГУ, где он временно использовался на арендной основе. В настоящее время наблюдения на этом телескопе жестко не регламентированы, поэтому его можно использовать для продолжительных непрерывных серий наблюдений. Группа инженерного обеспечения наблюдений (ГИОН) обслуживает стационарное оборудование на основных оптических телескопах САО: БТА и Цейсс-1000. Для данных телескопов время наблюдений распределяет Национальный комитет по тематике российских телескопов. В обязанности группы входит обеспечение технической эксплуатации штатного и вспомогательного наблюдательного оборудования, коммуникационных, управляющих и измерительных систем в фокусах данных телескопов (см. таблицу 1 и таблицу 2). Подготовка оборудования в фокусах телескопов согласно расписанию наблюдений, контроль работоспособности аппаратуры и устранение возникших технических неисправностей. Обслуживание и ремонт штатного и вспомогательного оборудования в фокусах телескопов. Прием в эксплуатацию новых наблюдательных систем и др.

Таблица 1. Штатная аппаратура для наблюдений на БТА

прибор	назначение	фокус телескопа
SCORPIO	многомодовый фокальный редуктор	ПФ
НЭС	эшелле-спектрометр высокого разрешения	Н2
ОЗСП	основной звездный спектрограф	Н2

Таблица 2. Штатная аппаратура для наблюдений на Цейсс-1000

прибор	назначение	фокус телескопа
CEGS	Эшелле-спектрометр	кудэ
UAGS	Спектрограф с длинной щелью с ПЗС	Кассегрен
ПЗС	ПЗС-камера для прямых снимков	Кассегрен

Немаловажное значение уделяется участию в разработке и изготовлении новых наблюдательных и вспомогательных систем [2] для обеспечения наблюдений на телескопах. За последнее время нами было внедрено более двух десятков наблюдательных систем различной конфигурации [3-5]. Специфика таких систем заключается в следующем. При получении изображений от слабых звездных объектов фоточувствительные элементы работают в режиме предельной одноэлектронной чувствительности, когда изображения звезд на экране видеоконтрольного устройства формируются небольшим числом одноэлектронных событий и сильно флуктуируют сквозь турбулентную атмосферу. Случайный характер распространения световых волн в турбулентной атмосфере и дополнительные флуктуации, возникающие при приеме и обработке сигнала, требуют привлечения различных подходов к описанию процессов формирования и регистрации изображений астрономических объектов [6].

В данной работе рассматриваются вопросы разработки систем для обеспечения наблюдений на крупнейших российских оптических телескопах БТА и Цейсс-1000. Предлагается методика оптимизации параметров таких систем, которая позволяет определить их оптимальные параметры.

Информацию от далеких звездных образований, которую получают астрономы с помощью больших оптических телескопов, порой приходится накапливать часами, т.к. свет от звезд очень слабый. Поэтому, точности сопровождения телескопом движущихся звездных объектов только за счет механических средств недостаточно при исследованиях на больших временных интервалах. Необходимо корректировать ведение телескопа (осуществлять гидирование) с целью постоянного возврата исследуемого объекта на ось визирования. Чаще всего методы гидирования используют визуальные наблюдательные системы, которые позволяют вручную вносить поправки в режиме сопровождения. Для больших оптических телескопов такие методы неприемлемы, т.к. в маленьком поле наблюдения может и не оказаться достаточно ярких опорных звезд. Поэтому для основных информационных каналов больших оптических телескопов, и для систем их слежения – наблюдателей – характерны проблемы обнаружения всё более слабых объектов при одновременном повышении пространственного разрешения. В функции наблюдателей и систем управления телескопом входит обеспечение наведения телескопа, отождествления получаемого изображения с эталоном (картой звёздного неба), увеличение точности гидирования телескопа. И все это должно работать в режиме автоматизированного управления телескопом.

Отличительной особенностью рассматриваемых наблюдателей [7] от основных информационных трактов телескопов является требование работы в реальном времени, обеспечивающей высокое разрешение, не только в пространстве, но и во времени. По сути, мы исследуем распределенный сигнал, при этом, рассматриваемый наблюдатель телескопа собирает меньшее количество света (меньшее количество информации об изучаемом процессе). Поэтому от наблюдателя требуется потенциальная помехоустойчивость, понимаемая, как возможность

точного измерения пространственно-временных координат и фотометрических характеристик объекта. Эта прагматическая составляющая дополняется методологической – потребностью практики проектирования систем коррекции в методике определения оптимальных параметров рассматриваемых наблюдателей, зависящих от совокупности оптико-механических параметров телескопов, выступающей в роли априорной информации при параметрическом синтезе элементов наблюдателей (телевизионных систем).

Формирование изображений астрономических объектов системой «атмосфера + телескоп»

Если диаметр телескопа D значительно превышает радиус корреляции атмосферных искажений (т.е. $D/r_0 >> 1$), то комплексный сигнал $V(\vec{x},t)$ в фокальной плоскости телескопа является асимптотически циркулярно-симметричным гауссовым процессом с нулевым средним.

В этом случае моменты интенсивности поля $S(\vec{x},t) = |V(\vec{x},t)|^2$

любого порядка N полностью определяются через функцию когерентности поля порядка (1,1) [8]

$$G_V^{1,1}(\vec{x}_1,\vec{x}_2,t_1,t_2) = < V(\vec{x}_1,t_1)V^*(\vec{x}_2,t_2) > =$$

$$= I_M g_2(t_1,t_2) \iint g_1(\vec{x}_1',\vec{x}_2') M(\vec{x}_1') M(\vec{x}_2') \exp[-j\frac{2\pi}{\lambda f}(\vec{x}_1'\vec{x}_1 - \vec{x}_2'\vec{x}_2) d\vec{x}_1' d\vec{x}_2' \qquad (1)$$

N=1 Средняя ФРТ

Средняя ФРТ системы «атмосфера + телескоп» находится из (1) при $x_1 = x_2$, $t_1 = t_2$ аппроксимацией показателя степени $3/2 \to 2$ в $g_1(1,2)$

$$S(\vec{x}) / S(0) = G_V^{1,1}(\vec{x}_1,\vec{x}_2,t_1,t_2) / G_V^{1,1}(0,0,0,0) = \exp(-x^2/2\sigma^2) \qquad (2)$$

где $\sigma = 0.5\lambda f/r_0$.

Выражение (2) – это профиль среднего изображения звезды при длительном накоплении. Профиль среднего кружка рассеяния в фокальной плоскости показан на рис. 1.

В зависимости от состояния атмосферы значение параметра Фрида r_0 в видимом диапазоне волн изменяется от 5 до 50 см с наиболее вероятным значением (10 – 20)см.

Среднее качество изображения звезды:

$$\omega \sim \lambda/r_0 \text{ в угл.сек.}, \; d \sim \lambda f/r_0 \text{ в мм.} \qquad (3)$$

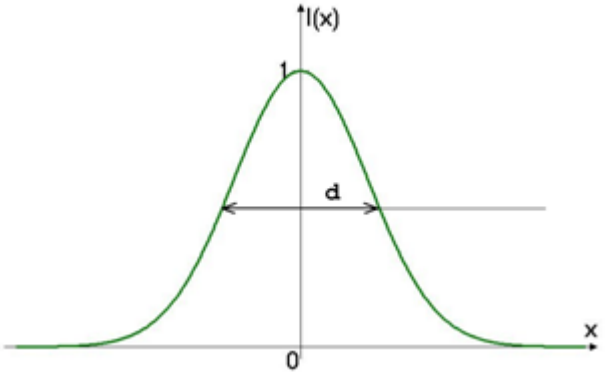


Рис. 1 Профиль среднего кружка рассеяния в фокальной плоскости телескопа

N=2 Статистика второго порядка S(x,t)

Момент второго порядка случайного процесса $S(\vec{x},t)$ выражается через функцию пространственной когерентности $g_V^{1,1}(1,2)$ [9]

$$G_S^{(2)}(\vec{x}_1,\vec{x}_2,t_1,t_2) = < S(\vec{x}_1) >< S(\vec{x}_2) > + | g_2(t_1,t_2) \cdot g_V^{1,1}(\vec{x}_1,\vec{x}_2) |^2 \cdot c \qquad (4)$$

$$< S(\vec{x}) >= \exp(-x^2 / d^2)$$

$$g_2(t_1,t_2) = \exp(-\frac{1}{2}\frac{(t_1-t_2)^2}{\tau_c})$$

$$g_V^{1,1}(\vec{x}_1,\vec{x}_2) = G_V^{1,1}(1) / G_V^{1,1}(1) \cdot G_V^{1,1}(2) = bes(\frac{\pi(\vec{x}_1-\vec{x}_2)D}{\lambda f})\exp[\, j\frac{\pi(\vec{x}_1^{\,2}-\vec{x}_2^{\,2})}{\lambda f}] \qquad (5)$$

c – константа, *bes* = besinc = $2J_1(y)/y$,
J(y) – функция Бесселя первого порядка.

С учетом (5) можно получить оценку пространственной корреляционной ячейки

$$A_C = \int |g_V^{1,1}(\overrightarrow{\Delta x})|^2 \, d\overrightarrow{\Delta x} = 4\lambda^2 f^2 / \pi D^2 \qquad (6)$$

и оценку масштаба поперечной пространственной когерентности в спекловой картине

$$L \sim \lambda f/D \qquad (7)$$

Таким образом, мгновенное изображение точечного объекта представляет собой 2-М интерференционную картину из совокупности $L \sim (D/r_0)^2$ пятен (тождественно – спеклов) с характерным размером кружка Эри $\lambda f/D$, а сами спеклы рассеяны в пределах области $<S(x)>$ размером $\lambda f/r_0$.

Итак, пространственно-временная структура ФРТ $S(\vec{x},t)$

имеет следующие компоненты:

I. Во временной области

1) быстрая составляющая $\tau_c = 0.36\frac{r_0}{\sqrt{\mathrm{var}(v)}}$, которая известна как время жизни («кипения») спеклов;

2) медленная составляющая $\tau_0 \sim D/<v>$, которая характеризует масштаб дрожания изображения звезды как целого.

Если скорость ветра флуктуирует так, что $\mathrm{var}(v) \sim \sqrt{\mathrm{var}(v)}$, то

$$\tau_0 >> \tau_r, \ т.к. \ D/r_0 >> 1.$$

Следовательно, динамику коротко-экспозиционного изображения звезды определяет время жизни спеклов τ_c на фоне медленно меняющейся составляющей с масштабом τ_0.

Для средних атмосферных условий: $r_0 \sim 10$см, $\sqrt{\mathrm{var}(v)} \sim < v > \sim 5$м/сек,

$$D = 6м, \ \tau_c \sim 0.01сек, \ \tau_0 \sim 1сек.$$

II. В пространственной области ФРТ характеризуется двумя масштабами:

– характерный «острый» масштаб пространственной корреляции, равный среднему размеру спекла $\sim \lambda f/D$;

– «плавный»пространственный масштаб 2-М огибающей среднего диска рассеяния звезды $d \sim \theta f \sim \lambda f/r_0$.

(длинно-экспозиционное изображение = среднее качество изображения).

Этот масштаб характеризует ФРТ системы «атмосфера + телескоп» при длительных накоплениях изображений звезд.

Для

$r_0 \sim 10$см, $f = 24$м, $D = 6$м, $\lambda_0 = 0.5$мкм, $r_c \sim 2$мкм,

$d \sim 120$мкм или $\theta \sim 1$ угл.сек.:

$$L \sim 3600 \text{ спеклов.}$$

Располагая оценками пространственно-временных масштабов корреляций в оптическом изображении и сопоставляя их с техническими параметрами ТВП, такими как площадь пикселя A = XY, время экспозиции T и длительность кадра $T_к$ можно сделать вывод о характере фотоэлектронной статистики в ТВП.

Располагая оценками пространственно-временных масштабов корреляций в оптическом изображении и сопоставляя их с техническими параметрами ТВП, такими как площадь пикселя A = XY, время экспозиции T и длительность кадра $T_к$ можно сделать вывод о характере фотоэлектронной статистики в ТВП.

Для ТВП типичны значения:

X,Y ~ (7 - 60) мкм,
$T_к$ = 0.02сек,
T ~ (0.02 – 2/3) сек.

Формирование изображений астрономических объектов наблюдательной системой

Сформированное в фокальной плоскости телескопа оптическое изображение преобразуется входным фотокатодом ТВП в поток первичных фотоэлектронов, которые в процессе дальнейшего электронно-оптического преобразования в ЭОПе образуют в мишени SIT или CCD зарядовый рельеф, пропорциональный интенсивности оптического изображения.

В ТВ камере I-SIT или ICCD в процессе поэлементного считывания мишени или ПЗС матрицы зарядовый рельеф преобразуется в видеосигнал i_0, статистические характеристики которого определяют качество наблюдаемого на ВКУ изображения.

Фон неба, термоэлектронная эмиссия первого фотокатода, процесс поэлементного считывания, усиление и оцифровка видеосигнала вносят в процесс фотодетектирования аддитивные шумы, которые снижают контраст в изображении. Для повышения отношения сигнал/шум (S/N) в наблюдаемом изображении используются два метода:

- постдетекторное усреднение изображений по большому числу кадров K;
- предкоммутационное накопление в ПЗС.

Располагая моделью оптического поля в изображении, можно найти статистические характеристики случайного числа первичных фотоэлектронов n в объеме выборки $TA\Delta\lambda$ при произвольных T/τ_c, A/A_c при $\Delta\lambda/\lambda < 1$.

Средний поток фотонов, собираемый апертурой телескопа, можно определить из выражения [10]:

$$I_M = <|V_M|^2> \sim \frac{\pi D^2}{4}\eta I_0 \cdot 10^{-0.4M}\Delta\lambda \qquad (8)$$

где η – средний коэффициент пропускания системы атмосфера + телескоп;
I_0 – внеатмосферный поток фотонов от звезды M=0, равный
$\sim 10^3$ (фотонов/см^2 ·Å · сек);
$\Delta\lambda$ – спектральный диапазон фотодетектирования (Å).

Разделив (8) на среднюю площадь звезды $\pi d^2/4$, где $d \sim \lambda f/r_0$, получим значение среднего потока фотонов на фотокатоде ТВП

$$< S_M >= S_M = \frac{4I_M}{\pi d^2} = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot 10^{-0.4M} \cdot \eta I_0 \Delta\lambda \qquad (9)$$

В предельном случае $A/A_c << 1$, $\tau/\tau_c << 1$ характер флуктуаций S(x,t) около своего среднего $<S_M>$ подчиняется плотности вероятности экспоненциального вида

$$P(S) = (1/<S>)exp(-S/<S>) \qquad (10)$$

с начальными моментами

$$<S^m> = m! <S>^m \qquad (11)$$

которые определяют контраст в спекловой картине

$$K = var(S) / <S>^2 = [<S^2> - <S>^2] / <S>^2 \quad (12)$$

Для К=1 контраст характеризует полностью развитое спекл-изображение звезды. Следует подчеркнуть, что условие $\Delta T << A_c\tau_c$ реализуется тогда, когда фокус телескопа f велик, а размер пикселя в ТВП и время выборки Т минимальны. Фактически, эта система описывает квази-спекл-интерферометрический режим работы ТВП, например в Н1, Н2 фокусах БТА и в фокусе Куде Цейсс-1000.

В этом случае случайное число фотоэлектронов n в отдельном пикселе описывается распределением Бозе-Эйнштейна:

$$p(n) = \frac{< n >}{(1+ < n >)^{n+1}} \quad (13)$$

где

$<n> = \alpha T A S_M$ – среднее число фотоэлектронов в пикселе площадью А за время Т;

α – средняя квантовая эффективность фотокатода.

Дисперсия этого распределения

$$var(n) = <n> (1+ <n>) \quad (14)$$

больше пуассоновской дисперсии $var(n) = <n>$ на величину $<n>^2$, которая при $<n> << 1$ стремится к 0.

Таким образом, только при очень маленьком объеме выборки АТ и малой интенсивности <S> имеет место пуассоновская фотоэлектронная статистика, обусловленная природой фотодетектирования.

В случае конечной площади пикселя А и конечной длительности экспозиции Т контраст в спекловой картине уменьшается до уровня

$$K = 1 / N_t \cdot N_S \qquad N_t > 1, \; N_S > 1 \quad (15)$$

и происходит замывание спеклового изображения.

Здесь N_t – число степеней свободы временных флуктуаций поля за время экспозиции Т;

N_S - число степеней свободы пространственных флуктуаций поля в пределах площади пикселя А.

С достаточной степенью точности:

$$N_t \sim 1 + T/\tau_c \; , \; N_S \sim 1 + A/A_c \quad (16)$$

Располагая сведениями о N_t и N_S, можно оценить степень отклонения статистики первичных фотоэлектронов от пуассоновской. Следует отметить, что если параметр N_t сильно зависит через τ_c от погодных условий и выбора экспозиции, то параметр N_S определяется типом ТВП и относительным отверстием телескопа F = f/D.

Степень отклонения от пуассоновской статистики при произвольных A/A_c и T/τ_c характеризует дисперсия потока первичных фотоэлектронов [11].

$$\mathrm{var}(n) =< n > (1 + \frac{< n >}{N_t \cdot N_S}) \quad (17)$$

Второй член в (17) отражает избыточный шум в ТВП из-за атмосферных флуктуаций. Чтобы статистика n была пуассоновской, необходимо условие

$$<n> << N_t N_S = N$$

Накопительные ПЗС системы

Рассмотрим накопительные ПЗС системы для обеспечения астрономических наблюдений. Длительному накоплению в ПЗС препятствует темновой ток, который сильно зависит от температуры ПЗС. Средний темновой ток в электрон/с·пиксел для Exview HAD CCD SONY Inc. [12], которые применяются в ТВП ICCD, зависит от температуры Т

$$q_T = q_{293} \cdot 122 \cdot exp(-6400/T) \quad (18)$$

где Т – температура в градусах Кельвина,

$q_{293} \sim 5 \cdot 10^3$ e/c·пиксел для T = 293 град.К.

Для неохлаждаемой CCD в ICCD максимальный темновой ток при t = 10град.С (средняя температура CCD в летний период наблюдений)

$$q_{283} \sim 2000\ e/c \cdot пиксел.$$

Для 1 поля ТВ ПЗС камер с чересстрочной разверткой (50 полей в секунду) время экспозиции

$$T = T_K = 0.02c$$

это соответствует 40 e/пиксел с шумом $\sigma \sim \sqrt{40} \sim 6.3$e rms
или $\sigma/G \sim 6.3 \cdot 10^{-4}$ e rms на фотокатоде.

Т.о. темновой ток в неохлаждаемой CCD при стандартной ТВ развертке не дает существенного вклада в общий шум ТВП. Однако, при накоплении в CCD при тех же условиях за время

$$T = 2/3c\ (T = 32T_K)$$

накопленный заряд составит 2000·2/3 ~ 1300e/пиксел с шумом $\sqrt{1300} \sim 36$e rms, что сравнимо с шумом считывания 50e rms.

При емкости пикселя ~ 20.000e/пиксел, 1300e/пиксел составит около 6,5%, что снизит диапазон CCD от 400:1 до 360:1, если не вычитать темновой ток CCD. Из этих оценок также видно, что в неохлаждаемой CCD за время накопления T ~ 20.000/2000 ~ 10c емкость пикселя будет полностью исчерпана за счет темнового тока CCD.

Выигрыш в проницаемости ICCD с неохлаждаемой CCD при большом времени накопления $T = T_K K$ по сравнению с ICCD со стандартной ТВ разверткой можно оценить:

$$(S/N)_{M1} = \sqrt{\langle n_{M1} \rangle} \sim \sqrt{T_K}$$
$$(S/N)_{M2} = \sqrt{\langle n_{M2} \rangle} \sim \sqrt{(kT_K)}$$
$$(S/N)_{M1} / (S/N)_{M2} = \sqrt{k} = 10^{-0.4\Delta M}$$

При $K = 32,\ \Delta M = M_1 - M_2 = 1.9$

Это значение экспериментально подтверждено в наблюдениях [13] на 1м телескопе Цейсс-1000.

В ПФ Цейсс-1000 шум от фона неба [9] равен:

$$\sigma_\Phi = \sqrt{\frac{\pi}{4}\eta\left(\frac{D}{f}\right)^2 SBAT} \sim 0.5e\_rms$$

При $T = 32T_K(2/3c)$, f = 12м, $AT \sim 0.8 \cdot 10^{-6}$, $B \sim 2 \cdot 10^{-4}$ нт, $S = 2 \cdot 10^{-4}$ А/лм и

$$\sigma_\Phi^2 >> \left\{\sigma_M^2, \sigma_ш^2, \sigma_t^2, \sigma_K^2\right\}$$

С учетом условия для обнаружения минимального сигнала $\sqrt{n}_M \sim 5\sigma$ при
θ = 2угл.сек., d ~ 0.12мм, из $5\sigma = 2.5$ получаем для Цейсс-1000:
Мпред ~ 17.5m для накопительной ICCD (время экспозиции $T=32TK \approx 2/3c$).

В первичном фокусе БТА при том же условии ($T \approx 2/3c$) накопительная ICCD может обеспечить предел

$$M_{пред} \sim 18.3^m\ (\theta = 2угл.сек).$$
$$M_{пред} \sim 19.8^m\ (\theta = 1угл.сек).$$

Выводы

Подводя итоги исследования систем для обеспечения астрономических наблюдений на крупнейших российских оптических телескопах САО РАН, позволяющих эффективно проводить на телескопах этапы наведения, отождествления звездных площадок и слежение за исследуемым объектом, необходимо применять фотоприемники с большим размером пикселя (и, следовательно, с большой электронной емкостью ПЗС), одновременно снижая темновой ток охлаждением ПЗС матрицы. Увеличение длительности экспозиции ПЗС камер приводит к повышению проницающей способности ТВ подсмотров на 1.5 – 2 зв. величины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drabek S. V., Komarov V.V., Potanin S.A., Savvin A.D., Moskvitin A. S., and Spiridonova O. I. Study of the quality of the Zeiss-1000 telescope optical system using the Shack-Hartmann wavefront sensor // Astrophysical Bulletin, 2017, v.72, №2, p. 227-238.

2. Комаров В.В. Параметрический синтез наблюдательных систем // Труды VIII всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», Нижний Архыз, 2017, с.150-156.

3. Комаров В.В., Семенко Е.А. Исследование современных полупрофессиональных ПЗС-камер для работы на оптических телескопах среднего класса // Известия ЮФУ. Технические науки, 2018, №7(201), с. 32-46.

4. Комаров В.В. EM-CCD CCTV-камера — исследование по небесным объектам // Прикладная физика, 2012, №2, с. 99-103.

5. Комаров В.В., Комаров А.В. Цифровые отечественные ПЗС-камеры для оптических телескопов // Прикладная физика, 2008, №4, с. 142-146.

6. Комаров В.В., Першин И.М. Граничные условия наблюдательных систем больших оптических телескопов // Материалы международной научной конференции “Математическая физика и ее приложения” (МФП-2012), Пятигорск, 2012, т.1, с.48-56.

7. Комаров В.В. Методика оптимизации параметров телевизионных наблюдательных систем больших оптических телескопов // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2013, №7, с.47-52

8. 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.

9. Витковский В.В., Комаров В.В. Наблюдательные системы больших оптических телескопов // Материалы международной научной конференции “Математическая физика и ее приложения” (МФП-2012), Пятигорск, 2012, т.1, с.42-47.

10. 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.

11. 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), Пятигорск, 2013, т.III, с.72-77.

12. Комаров В.В., Фоменко А.Ф., Шергин В.С. ТВ-система «Все небо» для мониторинга ночной облачности. // Прикладная физика, 2007, №5, с.130-134.

13. 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.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-189-197

Ачарова Ирина Александровна, Балашова Александра Александровна

Южный федеральный университет

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАДИУСУ ДИСКА ГАЛАКТИКИ

Аннотация. *Цель данного исследования - получить ограничения на синтез химических элементов, сравнивая современные распределения их содержания по радиусу диска с распределением содержания железа и кислорода. Эти выводы сопоставить с теоретическими оценками средней массы химических элементов, выбрасываемых в межзвездную среду при взрыве коллапсирующих сверхновых и сверхновых типа 1а.*

Ключевые слова: *химическая эволюция галактики, нуклеосинтез сверхновых звезд*

Annotation. *The purpose of this study is to obtain restrictions on the nucleosynthesis of chemical elements by comparing the present distribution of their abundances along the radius of the disk with the distribution of the similar abundances of iron and oxygen. These conclusions are compared with theoretical estimates of the average mass of chemical elements ejected into the interstellar medium during the explosion of core collapse supernovae and supernovae 1a.*

Список используемых сокращений

CHcc – коллапсирующие сверхновые
CH1a_P - сверхновые типа 1а от короткоживущих предшественников
CH1a_T - сверхновые типа 1а от долгоживущих предшественников

Введение

Задача расшифровки эволюции галактик является наиболее фундаментальной в астрофизике. Важную информацию для ее решения дает изучение особенностей в распределении разных химических элементов по диску Галактики. Поскольку для расшифровки этих особенностей надо знать структуру и эволюцию звездной и межзвездной среды, историю звездообразования, нуклеосинтез в звездах, поведение вещества, которое окружает Млечный Путь и т.д.

Лучше всего, на сегодняшний день, понятно производство кислорода и железа в различных типах звезд [1]. Наиболее простой для объяснения элемент – кислород. Он производится на 98% одним источником – коллапсирующими сверхновыми (обозначаются CH_{cc}). Коллапсирующие сверхновые – это термоядерный взрыв звезд с массой, больше 8 масс Солнца, финальная стадия их эволюции. Эти звезды занимают особое пространственное положение. Они концентрируются в спиральных рукавах.

Кроме коллапсирующих сверхновых, поставщиками тяжелых элементов (тяжелыми в астрофизике называются химические элементы, расположенные в таблице Менделеева правее углерода) в межзвездную среду являются сверхновые типа 1а. Тип 1а сверхновых не однороден. Больше половины этих звезд концентрируются в спиральные рукава [2,3], что говорит о том, что их предшественники – молодые звезды, которые за время своей жизни не успели заметно удалиться из спиральных рукавов. Эти сверхновые в англоязычной литературе получили название «проворные» (Prompt). Будем обозначать их CH_{1a_P}. Другая половина CH_{1a} не показывает концентрации к областям звездообразования, распределение частоты их взрывов по радиусу диска пропорционально радиальному распределению звездной плотности. Взрывы этого типа звезд в эллиптических галактиках, в которых звездообразование давно закончилось,

свидетельствуют о том, что предшественники могли иметь возраст несколько миллиардов лет. Исследователи назвали их «медлительными» (Tardy). Будем обозначать их CH_{1a_T}.

Железо синтезируется различными типами сверхновых в следующей пропорции: ~30% производится в CH_{cc}, ~35% в CH_{1a_P}, ~35% в CH_{1a_T} [1]. То есть 65% железа производится короткоживущими предшественниками. С другими тяжелыми элементами ситуация менее определена. Поэтому в данной работе была поставлена задача получить ограничения на синтез химических элементов, сравнивая современные распределения их содержания по радиусу диска с распределением содержания железа и кислорода. Похожий узор их обилия интерпретировался как схожее распределение источников в галактике, а именно, то, что эти элементы в одинаковой пропорции производятся в сходных условиях. Эти выводы сопоставлялись с теоретическими оценками средней массы химических элементов, выбрасываемых в межзвездную среду при взрыве одной CH_{cc} или CH_{1a} и с частотами таких взрывов. Важно отметить, что для CH_{1a_P} до сих пор нет модели предшественника и, соответственно, теоретически рассчитанного нуклеосинтеза. Таким образом, настоящая работа позволила сделать предположения о нуклеосинтезе CH_{1a_P}.

При решении поставленной задачи необходимо было также учесть, что производство некоторых химических элементов в звездах в сильной степени зависит от того количества металлов, которое было в звезде изначально. Поскольку учет детальной эволюции металличности на различных расстояниях от галактического центра сильно усложнит поставленную задачу, то мы рассматривали эволюцию содержания только тех элементов, производство которых не зависит от металличности.

1. Наблюдательный материал

Для того, чтобы получить современное распределение содержания химических элементов по радиусу диска, нужны очень яркие молодые объекты, которые видны на больших расстояниях. Такими объектами могут быть зоны ионизованного водорода и цефеиды. Использовать зоны ионизованного водорода для нашей задачи не подходит, так как ошибка определения расстояний до них составляет 50% и она сглаживает особенности в распределении тяжелых элементов. Лучше всего для нашей цели подходят цефеиды, так как они являются трассерами расстояния, ошибка определения расстояний до них 10%. Их химический состав отражает состав газовой среды, из которой они образовались. Поэтому мы используем данные работ Андриевского и др. 2002-2012 [4-9] по наблюдениям химического состава цефеид. Эти данные были усреднены в пределах полос усреднения 0.5 кпк.

В дальнейшем изложении используем стандартные обозначения, означающие содержание рассматриваемого элемента в звезде относительно его содержания на Солнце:

Например,

$$[Fe/H] = \lg(N_{Fe}/N_H)_{star} - \lg(N_{Fe}/N_H)_{Sun}$$

Аналогично:

$$[O/H] = \lg(N_O/N_H)_{star} - \lg(N_O/N_H)_{Sun}$$

$$[O/Fe] = [O/H] - [Fe/H]$$

где N - количество атомов рассматриваемого элемента

2. Анализ радиальных распределений содержания химических элементов

2.1 Анализ радиальных распределений железа и кислорода

Среди всех названных элементов, расшифровку производства надо начинать с кислорода. Как уже говорилось, у него один основной источник – CH_{cc}. Поэтому в теории нуклеосинтеза этого элемента всего один свободный параметр – средняя масса выброшенного кислорода при взрыве CH_{cc}. Ключевым моментом для разработанного метода явился излом на распределении содержания кислорода вблизи солнечного радиуса (см. рис. 2). Идея, подробно описанная в [1], состояла в том, что за формирование излома на распределении ответственно влияние

спиральных рукавов, оказывающее стимулирующее воздействие спиральной волны плотности на темп образования массивных звезд на данном радиусе.

Интенсивность галактической ударной волны, от которой зависит темп образования массивных звезд, пропорциональна разности угловых скоростей вращения вещества диска и спиральных рукавов. Скорость вращения вещества диска зависит от галактоцентрического расстояния, а скорость вращения рукавов - константа (рис. 1). Радиус, на котором они совпадают, называется коротация (от английского слова corotation – совместное вращение).

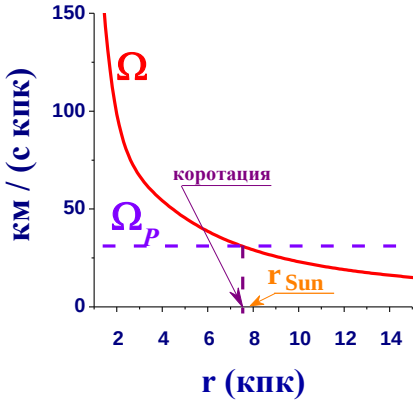


Рис. 1. Угловая скорость вращения вещества диска – красный график, убывает с расстоянием от центра галактического диска, скорость вращения рукавов – сиреневый график – константа. Радиус, на котором обе скорости совпадают, называется коротацией.

Темп образования массивных звезд, ответственных за производство кислорода, описывается выражением, полученным и подробно проанализированным в работе Ачаровой и Мишурова [1]:

$$\psi_H(r,t) = \beta\left|\Omega(r) - \Omega_p\right|\mu_g^k(r,t) \qquad (1)$$

В коротации скорость образования массивных звезд равна нулю, как видно из (1).

Темп образования маломассивных звезд

$$\psi_L(r,t) = \nu\mu_g^k(r,t) \qquad (2)$$

Как видно из выражения (1), темп образования коллапсирующих сверхновых и сверхновых типа 1а от короткоживущих предшественников пропорционален частоте пересечения спиральных рукавов, поэтому в области коротации он равен нулю. Темп сверхновых 1а от долгоживущих предшественников, выражение (2), от этой частоты не зависит и пропорционален газовой плотности (рис. 2).

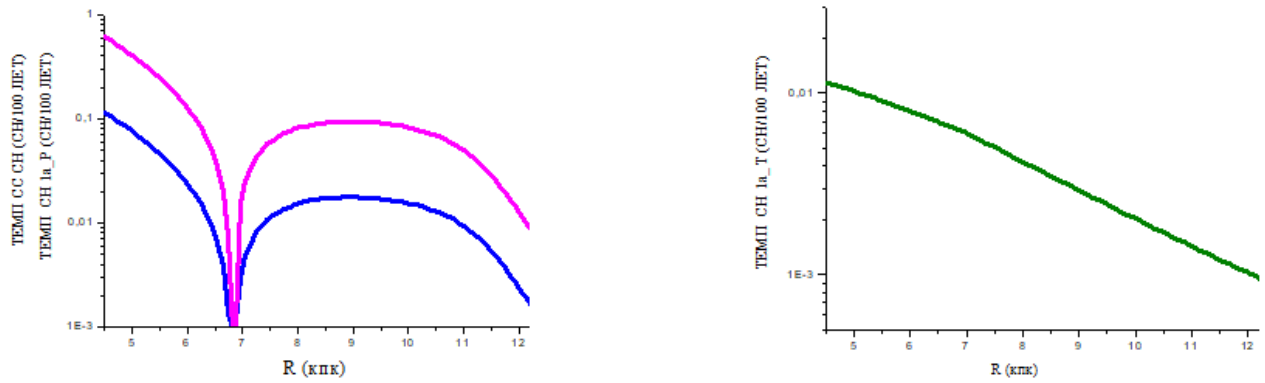


Рис. 2. Слева - темп образования коллапсирующих сверхновых (розовый график) и сверхновых типа 1а от короткоживущих предшественников (синий график) в зависимости от радиуса галактического диска. В коротации образование массивных звезд подавлено, и, следовательно,

обогащение кислородом тоже подавлено. Справа - темп образования сверхновых 1a от долгоживущих предшественников. Он повторяет ход газовой плотности в логарифмической шкале.

Совместный учет коротации и диффузии приводит к тому, что столь резко выраженная особенность замывается и на графике вместо глубокого минимума формируется горизонтальный участок. Полученный теоретический узор обилия кислорода исключительно хорошо согласуется с наблюдениями (рис. 3).

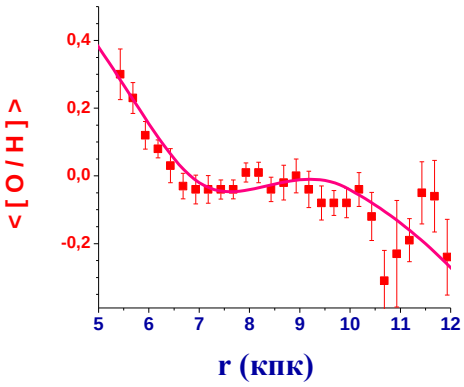


Рис. 3. Сравнение теоретического и наблюдательного радиальных распределений содержания кислорода (^{16}O).

Как уже было сказано во введении и подробно описано в [1], железо синтезируется различными типами сверхновых в следующей пропорции: ~30% производится в CH_{cc}, ~35% в CH_{1a_P}, ~35% в CH_{1a_T}. Темп производства железа является суперпозицией трех графиков, показанных на рис. 4, с некоторыми коэффициентами, зависящими от массы синтезированного железа каждым из подтипов сверхновых.

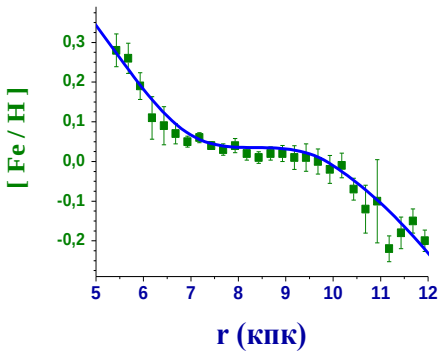


Рис. 4. Сравнение теоретического и наблюдательного радиальных распределений содержания железа (^{56}Fe).

2.2 Сравнение радиального распределения кремния (^{28}Si) с распределением железа и кислорода

В первую очередь, рассмотрим те элементы, производство которых в звезде зависит только от водорода и гелия. Например, кремний. На первом шаге сравним его радиальное распределение содержания с аналогичным для железа. На рис. 5 показано распределение кремния $[Si/H]$, железа $[Fe/H]$, и график $[Si/Fe]$, который получается вычитанием из $[Si/H]$ $[Fe/H]$. Если радиальные распределения элементов похожи, то график $[Si/Fe]$ будет горизонтальной линией. Как видно из рис. 5, именно этот случай имеет место. Он означает, что вклад в производство этих химических элементов от источников с различным пространственным

расположением производится в равной пропорции, другими словами, примерно 2/3 массы этого элемента производят массивные звезды. График отношения $[Si/Fe]$ выше нуля, значит, это отношение в самых молодых объектах больше, чем на Солнце. Обратимся к теоретическим оценкам производства железа и кремния в различных типах сверхновых.

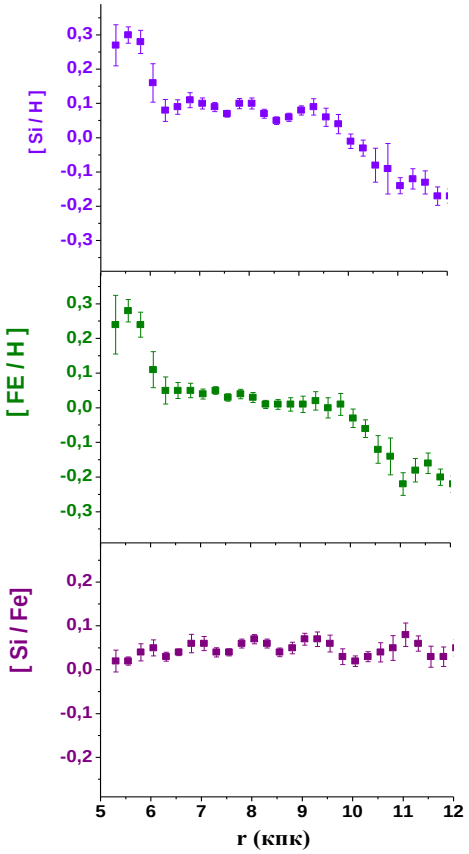


Рис. 5. Сравнение радиальных распределений кремния (^{28}Si) и железа (^{56}Fe).

Средняя масса кремния, синтезируемая при взрыве CH_{cc}, лишь на 20% превосходит аналогичную для железа: $\langle m_{Fe}\rangle_{cc} = 0.08\,M_0$, $\langle m_{Si}\rangle_{cc} = 0.10\,M_0$, то есть вклад от CH_{cc} сопоставим. При взрыве CH_{1a} кремния производится в 4 раза меньше, чем железа $\langle m_{Fe}\rangle_{Ia\_T} = 0.61 M_0$, $\langle m_{Si}\rangle_{Ia\_T} = 0.15\,M_0$ [10]. При анализе средних масс надо иметь в виду два важных обстоятельства: 1) взрывы CH_{cc} происходят в 4 раза чаще, чем взрывы CH_{1a} [11], а взрывы CH_{1a_P} в 4 раза чаще, чем CH_{1a_T} [11]; 2) нуклеосинтез CH_{1a} рассчитан для модели взрыва белого карлика, что ближе соответствует модели CH_{1a_T}. Окончательно, нет общепринятого представления, какие процессы приводят к взрыву CH_{1a_P}. Таким образом, при теоретическом моделировании, на следующем этапе исследования, надо исходить из ограничения, что совместный вклад от CH_{cc} и CH_{1a_P} должен составить около 65%, как и для железа. Вклад от CH_{1a_T} около 35%. Отсюда следует, что вклад от CH_{1a_P} в производство кремния должен оказаться меньше, чем от CH_{1a_T}. И хотя вклад от разных подтипов сверхновых не линейный, можно предсказать, что $\langle m_{Si}\rangle_{Ia\_P}$ будет меньше $0.07\ M_0$. Эта оценка близка к $0.04\ M_0$, которая получаются в модели CH_{1a}, в которой нуклеосинтез происходит в результате турбулентной дефлаграции, согласно [12]. Более точные оценки можно получить при детальном моделировании.

Рассмотрим рис. 6, в котором отношение содержания кислорода и кремния $[Si/O]$ не является горизонтальной линией, и это согласуется с оценками синтеза этих элементов в звездах.

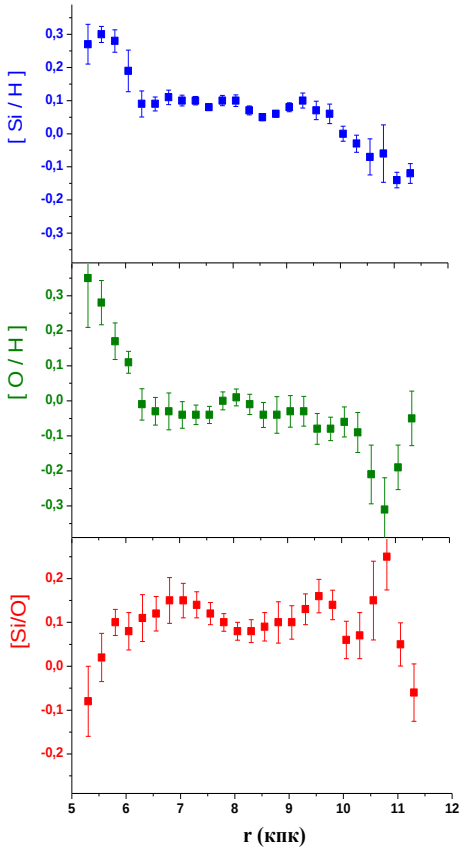


Рис. 6. Сравнение радиальных распределений кремния (^{28}Si) и кислорода (^{16}O).

Мы видим, что вклад в производство кислорода от одной сверхновой второго типа $\langle m_O \rangle_{cc} = 1.80\, M_0$ в восемнадцать раз выше вклада в производство кремния, более того, кислород почти полностью (на 98%) производится этим одним типом сверхновых. То есть вклад в производство кислорода от массивных звезд гораздо больше, чем для кремния. При этом вклад от CH_{1a_T} сопоставим: $\langle m_{Si} \rangle_{Ia} = 0.15\, M_0$, $\langle m_O \rangle_{Ia} = 0.14\, M_0$ и на порядок меньше, чем вклад от CH_{cc}. Это приводит к тому, что во внутренних областях диска, до расстояния 7 кпк, для отношения $[Si/O]$ мы видим заметный градиент. Тем самым, этот результат получает объяснение. Содержание $[Si/O]$ в области от 7 до 11 кпк больше, чем аналогичное на Солнце.

2.3 Сравнение распределения титана (^{48}Ti) с распределением железа

Рассмотрим рис. 7, на котором показано распределение кремния $[Ti/H]$, железа $[Fe/H]$, и график $[Ti/Fe]$, который получается вычитанием из $[Ti/H]$ $[Fe/H]$. Радиальные распределения $[Ti/H]$ и $[Fe/H]$ похожи, поэтому график $[Ti/Fe]$ будет горизонтальной линией.

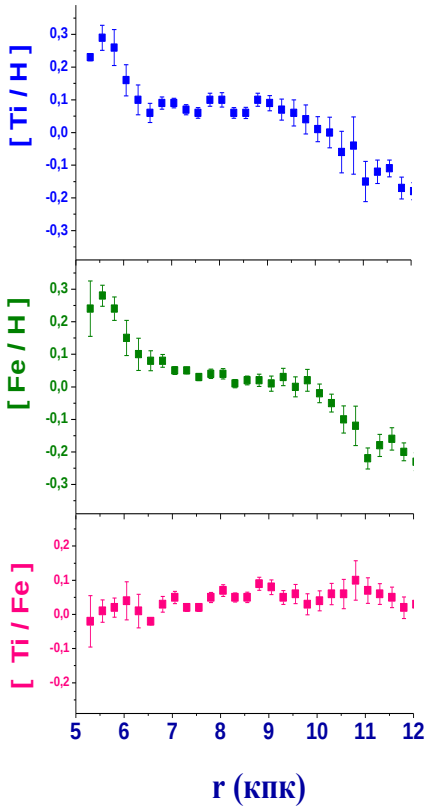


Рис. 7. Сравнение радиальных распределений (^{48}Ti) и железа (^{56}Fe).

$\langle m_{Ti} \rangle_{cc} = 1.16 \cdot 10^{-4} M_0$ примерно в два раза меньше $\langle m_{Ti} \rangle_{Ia\_T} = 2.03 \cdot 10^{-4} M_0$. $\langle m_{Fe} \rangle_{cc} = 0.08 \cdot M_0$ примерно в 7.5 раз меньше $\langle m_{Fe} \rangle_{Ia\_T} = 0.61 \cdot M_0$. То есть процентный вклад от CH_{cc} в производство титана в несколько раз выше, чем в производство железа. Поскольку отношение $[Ti/Fe]$ практически горизонтальное, отсюда можно сделать вывод, что примерно 65% каждого из этих элементов производится в массивных звездах. Отсюда следует, что процентный вклад от CH_{1a_P} в производство титана должен быть меньше, чем в производство железа. То есть $\langle m_{Fe} \rangle_{Ia\_P}$ должна быть больше $\langle m_{Fe} \rangle_{cc}$, а $\langle m_{Ti} \rangle_{Ia\_P}$ должна быть меньше $\langle m_{Ti} \rangle_{cc}$. Оценки порядка $2.5 \cdot 10^{-5} - 3.8 \cdot 10^{-5} M_0$ получаются в модели CH1a, в которой нуклеосинтез происходит в результате турбулентной дефлаграции, согласно [12]. Как и по результатам анализа кремния, эта модель наиболее подходит для описания CH_{1a_P}. Более точные оценки можно получить при детальном моделировании.

2.4 Сравнение распределения марганца (^{55}Mn) с распределением железа

Анализ графиков содержания марганца тоже указывает на интересную особенность, требующую объяснения.

Теория говорит о том, что он одинаково эффективно производится различными сверхновыми, но его производство при взрыве массивных звезд должно расти с увеличением содержания кислорода, углерода и других тяжелых элементов.

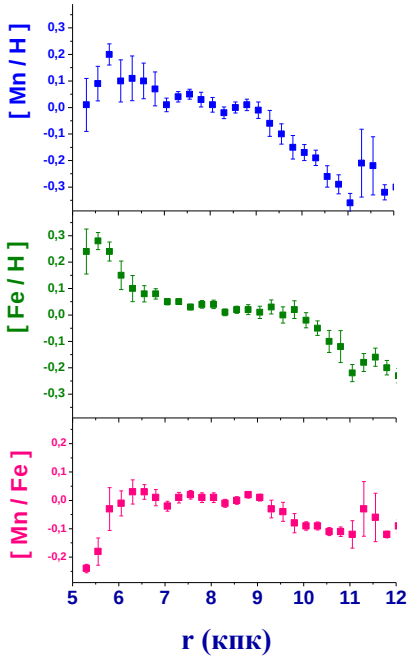


Рис. 8. Сравнение радиальных распределений марганца (^{55}Mn) и железа (^{56}Fe).

В центральных областях диска таких элементов больше всего, а наблюдаемое распределение (рис. 8, верхний график) показывает, что производство марганца во внутренних областях, наоборот, подавлено. Таким образом, мы получили указание на несоответствие теории и наблюдений. Мы провели анализ содержания марганца в газе во внутренней области диска [13] по другим типам звезд, красным гигантам, и эффекта уменьшения его содержания не обнаружили. Отсюда следует, что надо, в первую очередь, пересмотреть методику расшифровки содержания марганца по спектрам в цефеидах.

Вывод

В данной работе был представлен метод получения ограничений на синтез химических элементов в сверхновых типа 1a, произошедших от короткоживущих предшественников. Он основан на том, что радиальные распределения химических элементов сравнивались с распределениями кислорода и железа. Похожий узор их обилия интерпретировался как схожее распределение источников в галактике, а именно, то, что эти элементы в одинаковой пропорции производятся в сходных условиях. Эти выводы сопоставлялись с теоретическими оценками средней массы химических элементов, выбрасываемых в межзвездную среду при взрыве одной CH_{cc} или CH_{1a}. Метод продемонстрирован для кремния, титана, марганца.

1) Получено, что примерно 2/3 массы этого кремния производят массивные звезды. Можно предсказать, что $\langle m_{Si} \rangle_{Ia\_P}$ будет меньше $0.07\ M_0$. Оценки порядка $0.04\ M_0$ получаются в модели CH_{1a}, в которой нуклеосинтез происходит в результате турбулентной дефлаграции, согласно [12]. Более точные оценки можно получить при детальном моделировании и статистического анализа.

2) Получено, что примерно 2/3 массы титана производят массивные звезды. Процентный вклад от CH_{Ia_P} в производство титана должен быть меньше, чем в производство железа. То есть $\langle m_{Fe} \rangle_{Ia\_P}$ должна быть больше $\langle m_{Fe} \rangle_{cc}$, а $\langle m_{Ti} \rangle_{Ia\_P}$ должна быть меньше $\langle m_{Ti} \rangle_{cc}$. Оценки порядка $2.5 \cdot 10^{-5} - 3.8 \cdot 10^{-5}\ M_0$ получаются в модели CH_{1a}, в которой нуклеосинтез происходит в результате турбулентной дефлаграции, согласно [12]. Как и по результатам анализа кремния, эта

модель наиболее подходит для описания CH_{1a_P}. Более точные оценки нуклеосинтеза можно получить при детальном моделировании и статистического анализа.

3) Установлено, что надо пересмотреть методику расшифровки марганца по спектрам в цефеидах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acharova, I., Mishurov, Yu. et al., 2013, Astron. and Astrophys., 557, 107
2. Mannucci, F., DellaValle, M., Panagia, N., et al. 2005, Astron. and Astrophys., 433, 807
3. Mannucci, F., Della Valle, M., & Panagia, N. 2006, Month. Not. Roy. Astron. Soc., 370, 773
4. Andrievsky, S., Kovtyukh, V., Luck, R., et al. 2002a, Astron. and Astrophys., 381, 32
5. Andrievsky, S., Bersier, D., Kovtyukh, V., et al. 2002b, Astron. and Astrophys., 384, 140
6. Andrievsky, S., Kovtyukh, V., Luck, R., et al. 2002c, Astron. and Astrophys., 392, 491
7. Luck R.,GierenW.,Andrievsky S.,KovtyukhV., Fouqu´e P., Pont F., Kienzle F., 2003, Astron. and Astrophys., 401, 939
8. Luck R., Kovtyukh V., Andrievsky S., 2006, Astron. J, 132, 902
9. Luck R. E., Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Gieren W., Graczyk D., 2011, Astron. J, 142, 51
10. Tsujimoto T., Nomoto K., Yoshii Y., Hashimoto M., Yanagida S., Thielemann F.-K., 1995, Month. Not. Roy. Astron. Soc., 277, 945
11. Li, W., Chornock, R., Leaman, J., et al. 2011, Month. Not. Roy. Astron. Soc., 412, L1473
12. Leung Sh.-C., Nomoto K., 2018, Astrophys. J, 861,143
13. Barbuy, B., Hill, V., Zoccali, M., et al. 2013, Astron. and Astrophys., 559, A5

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-198-203

Ачарова Ирина Александровна, Воротилина Светлана Сергеевна

Южный федеральный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИКИ

Аннотация. *Цель данного исследования - смоделировать приток высокоскоростных облаков в диск нашей Галактики и проанализировать, к каким наблюдательным проявлениям приведет такой процесс. На основе расчетов получены следующие результаты. Равномерный приток единичного высокоскоростного облака, либо газа разрушающейся карликовой галактики не приведет к заметному повышению плотности и понижению металличности газа в области аккреции. Аккреция газа временно сформирует область пониженной металличности только в том случае, если ее рассматривать в виде притока массивных фрагментов. Получившиеся в результате аккреции особенности сгладятся примерно за миллиард лет.*

Ключевые слова: *формирование и эволюция Галактики, аккреция газа*

Annotation. *The purpose of this study is to simulate the inflow of high- velocity clouds into the disk of our Galaxy and to analyze what observational manifestations such a process will lead to. Based on the calculations obtained the following results. Uniform inflow of a single high- velocity cloud or a gas of a disrupting dwarf galaxy will not lead to a noticeable increase in the density and decrease in the metallicity of the gas in the accretion region. The accretion of gas will temporarily form a region of low metallicity only if it is considered as an inflow of massive fragments. The resulting accretion features smooth out in about a billion years.*

Введение

В последнее время появляется все больше наблюдательных фактов о существенной роли обмена массой между дисками галактик и окологалактическим пространством. На основе этих результатов и данных измерений распределения газа во внутренней части гало нашей Галактики, в частности, высокоскоростных облаков и галактик-спутников, предпринимаются попытки эволюционно связать газовые потоки и звездное население в диске. Форма галактических дисков однозначно указывает на то, что они образовались в результате эволюции диссипативной среды (газа), которая теряла энергию на излучение при сохранении момента импульса, а возраст дисков, определенный по спектру излучения, говорит о том, что более 7 млрд лет назад они уже существовали и испытывали интенсивное звездообразование. Если посмотреть на фотографии далеких галактик, свет от которых шел 7-8 млрд лет, то видно, что такие галактики действительно очень богаты газом, который светится за счет процессов идущего в нем звездообразования (рисунок 1).

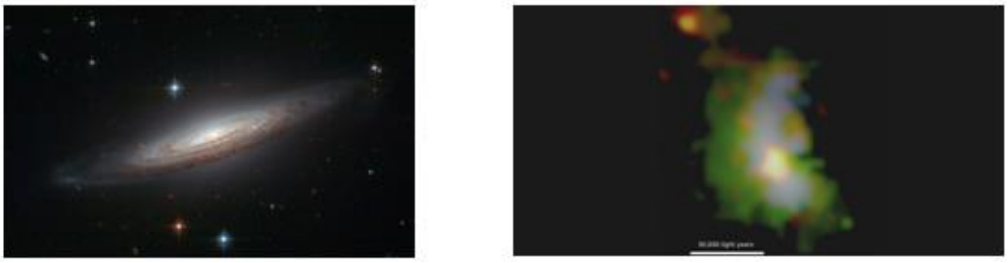


Рисунок 1. Изображение галактических дисков на разных этапах эволюции. Слева - характерный вид галактических дисков в современную эпоху, справа - вид галактических дисков 7-8 млрд лет назад.

Газовая аккреция продолжается и в настоящее время, но темп притока газа извне в тысячи раз ниже первоначального. Наблюдательным подтверждением этого процесса являются высокоскоростные облака, скорость которых порядка 100 км/с, эпизодически выпадающие на галактические диски. Особенностью таких облаков является то, что они в десятки раз беднее тяжелыми элементами, чем газ галактического диска.

На первом этапе решения задачи был исследован большой объем литературных источников, чтобы найти результаты наблюдений процесса взаимодействия аккрецируемого облака с веществом галактического диска, с целью иметь представление о том, как моделировать такие процессы. Приближающиеся облака имеют форму кометы, вследствие лобового давления со стороны диффузного газа галактического гало [1]. Вблизи галактического диска они фрагментируют под действием приливных сил. Наблюдения показывают [2], что облако соединяется с веществом диска не сразу, на первых стадиях его фрагменты проходят сквозь галактический диск, потеряв при этом часть своей энергии, и сливаются с веществом диска после череды колебаний относительно его плоскости (рисунок 2).

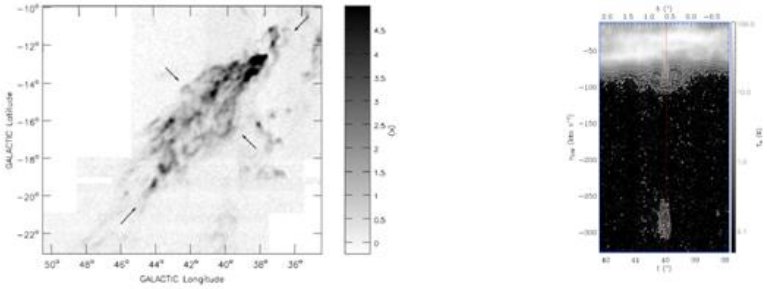


Рисунок 2. Слева - приближающееся к диску высокоскоростное облако Смитта, структура которого изучена в исследовании [1], в галактической системе координат (галактическая долгота – ось абсцисс, галактическая широта или высота над плоскостью диска – ось ординат). Справа – фрагмент высокоскоростного облака, проходящий через галактический диск, из [2].

На втором этапе решения задачи была обширная работа с литературой с целью поиска молодых звездных объектов, металличность которых значительно ниже металличности окружающих объектов диска. Такие объекты были найдены.

На основе каталога рассеянных скоплений [3] построен график, по оси абсцисс которого расстояние объекта от центра галактического диска, по оси ординат – металличность. Помимо нескольких одиночных скоплений заметно выделяется группа, расположение которой над плоскостью диска напоминает расположение фрагментов аккрецируемого облака Смитта (рисунок 3). Этот факт наталкивает на мысль, что рассеянные скопления образовались внутри фрагментов высокоскоростного облака.

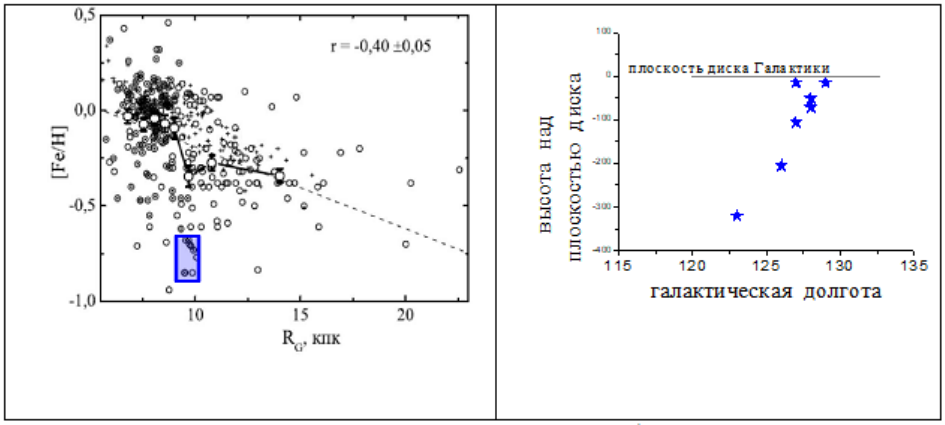


Рисунок 3. Слева - график из статьи [3], по оси абсцисс которого расстояние рассеянного скопления от центра галактического диска, по оси ординат – металличность, которая означает суммарное содержание химических элементов тяжелее углерода. Внутри синего прямоугольника

выделяется группа облаков, расположенных на близких долготах, которые могли образоваться внутри одного облака. Эта группа скоплений показана на рисунке справа в галактической системе координат. Пространственное расположение рассеянных скоплений напоминает расположение фрагментов высокоскоростного облака Смитта.

Возраст этих скоплений оценивается в несколько млн лет, что означает, что они очень молоды, еще должны быть окружены газом, нагретым излучением звезд.

Как часто можно ожидать наблюдать группу рассеянных скоплений, формирующихся из вещества высокоскоростного облака? Как показывают наблюдательные оценки процессов звездообразования, в звезды переходит лишь несколько процентов массы облака. Поэтому, для того, чтобы сформировать десяток рассеянных скоплений, массы которых вблизи тысячи масс Солнца, нужно облако массой не меньше 10^5 масс Солнца (далее кратко M_0). Такие массивные облака вблизи галактик редки. Кроме того, мы наблюдаем звездные объекты в секторе, а не на всей площади галактического диска. То есть наблюдение группы рассеянных скоплений, сформированных в аккрецируемом газе, редкое событие.

Что касается облаков меньших масс, порядка 10^3 M_0, то в этом году впервые пронаблюдали их плотные фрагменты в инфракрасном диапазоне [4] и увидели, что они содержат внутри себя небольшие группы звезд, около 2-х десятков, их массы малы, максимальная около 3 M_0. Такие звезды становятся в конце своей эволюции красными гигантами. Годом раньше как раз установили, что на любом расстоянии от центра галактического диска среди молодых звезд наблюдаются низкометалличные красные гиганты [5] - это противоречит эволюции металличности вещества диска и может быть, по нашему мнению, объяснено только притоком низкометалличного вещества.

Таким образом, мы выяснили, что внутри фрагментов газовых облаков образуются звезды, но основная масса облака, больше 95%, аккрецируется диском в газовой форме. Чтобы понять, к каким наблюдаемым эффектам такая аккреция приведет, мы выполнили серию численных экспериментов. Математическая модель – стандартная в теории формирования и эволюции дисков, включая их химическую эволюцию [6,7].

Уравнения (1) и (2) описывают эволюцию газовой плотности и звездной плотности

$$\frac{\partial \mu_g(r,t)}{\partial t} = f(r,t) - \psi(r,t) + \int_{m_l}^{m_u} (m - m_w)\psi(r, t-\tau_m)\phi(m)dm \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \mu_s(r,t)}{\partial t} = \psi(r,t) - \int_{m_l}^{m_u} m\psi(r, t-\tau_m)\varphi(m)dm \qquad (2)$$

где $\mu_g(r,t)$ и $\mu_s(r,t)\,\mu_g(r,t)$ – поверхностная плотность межзвездного газа и звезд, соответственно. В начальный момент времени газовая и звездная плотности принимались равными нулю;

$f = A(r)\exp(-\frac{t}{\tau_f}) + \Delta(r,t)$ - темп притока межгалактического газа на диск, где первое слагаемое описывает регулярный приток газа, характерное время которого $\tau_f = 2$ *млрд лет* , поэтому вклад от него в настоящее время пренебрежимо мал, а второе слагаемое – эпизодический приток высокоскоростных облаков;

$\psi(r,t) = \nu\mu_g^k$ - скорость звездообразования, где показатель $k = 1.5$, согласно экспериментально установленному закону Шмидта [8];

$\varphi(m) = 0.1716\, m^{-2.35}$ - начальная функция масс Солпитера [9],

m_w - масса звездного остатка, зависящая от начальной массы звезды.

Уравнение (3) описывает эволюцию содержания металлов в газовой среде, в нашем случае, кислорода

$$\dot{\mu}_O = \int_{m_l}^{m_u} (m - m_w) Z_O(t - \tau_m) \psi(t - \tau_m) \varphi(m) dm + E_O + f Z_{O,f} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_g D \frac{\partial Z_O}{\partial r} \right) \qquad (3)$$

где Z_O - массовая доля кислорода в газе, E_O - темп синтеза кислорода при взрыве коллапсирующих сверхновых, $Z_{O,f}$ - содержание кислорода в аккрецируемом газе.

Последнее слагаемое в уравнении (3) описывает диффузию. D - коэффициент диффузии тяжелых элементов. Природу диффузии мы связываем с различного рода турбулентностью в межзвездной среде, возникающей вследствие звездного ветра, взрывов сверхновых, галактических фонтанов и т.д.

В качестве начальных условий уравнения (3) принимается содержание кислорода, равное его содержанию в падающем газе. В качестве граничных условий использовались так называемые естественные условия для диффузионных процессов - отсутствие потоков на внешней границе и в центре: при $r = r_G = 25$ кпк и r =0 кпк $\partial Z_O / \partial r = 0$.

Детально уравнения описаны в [10].

Итак, если в современную эпоху в область от 9 до 10 кпк закончилась аккреция облака массой 10^5 M_0, то, как показывают исследования, ни на распределении газовой плотности, ни на содержании металлов в газовой среде, четко выраженной особенности мы не увидим. Дело в том, что облако представляется в виде филамента длиной 1 кпк и площадью основания радиусом $25пк$. Если перед тем, как остаться в диске, облако имеет скорость около 50 км/с, то оно аккрецируется за 200 млн лет. Объекты галактического диска, находящиеся на расстоянии 9 кпк от центра, делают один оборот вокруг центра Галактики за 250 млн лет. Поэтому за 200 млн лет диск повернется на 280^0, то есть аккреция происходит на сегмент кольца. На рисунке 4 показаны результаты проявления такой аккреции. Для фиксированного азимутального угла, на котором был приток газа облака, ни на газовой плотности, ни на распределении металличности, эффект не заметен. Это объясняется тем, что газовая добавка вызывает увеличение звездообразования, согласно закону Шмидта. А на распределении металличности в газе эффект не виден, т.к. приток облака с такими параметрами не способен заметно разбавить уже имеющееся в этой области количество газа. В добавок, за счет диффузионных процессов происходит перемешивание металлов из окружающих областей.

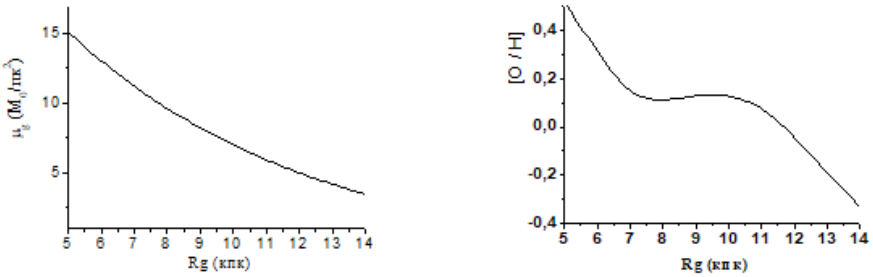


Рисунок 4. Результаты численного моделирования проявления аккреции высокоскоростного облака, массой 10^5 M_0, скорость которого 50 км/с. Слева – радиальное распределение газовой плотности. Справа - радиальное распределение содержания металлов в газовой среде. Графики черного цвета – без учета притока облака, красного цвета – с учетом притока облака в область от 9 до 10 кпк.

Следующий эксперимент соответствует разрушению карликовой галактики, которая была захвачена нашей Галактикой. Наблюдательных примеров процессов взаимодействия галактик много (рисунок 5). До того, как звезды карликовой галактики поглощаются гигантской галактикой, газ под влиянием приливного воздействия формирует поток от карликовой

галактики к гигантской. Металличность карликовых галактик близка к металличности высокоскоростных облаков, то есть примерно в 10 раз ниже солнечной металличности.

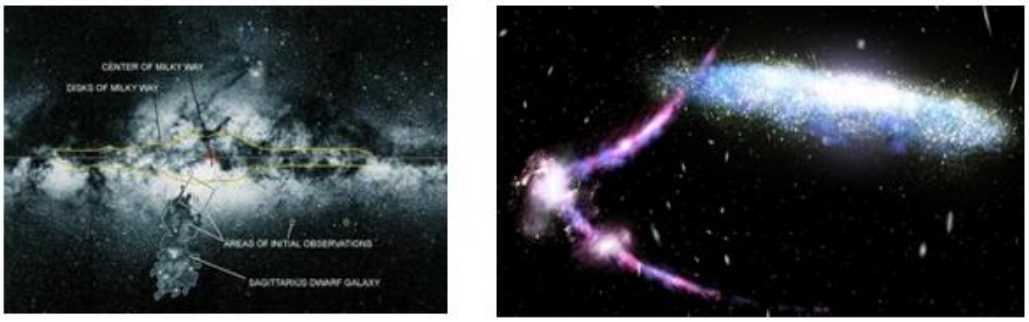


Рисунок 5. Слева - захват нашей Галактикой карликовой галактики SagDeg [11]. Справа схематическое изображение - газовый поток (розово-фиолетовый) к нашей Галактике (синий цвет) от ее карликовых спутников – Большого и Малого Магеллановых облаков (розовый цвет) [12].

Исходя из такой модели, мы в область от 9 кпк до 10 кпк аккрецировали газовый поток массой 10^8 M_0 в течении 500 млн лет. Сечение взаимодействия облака с веществом диска 1 квадратный килопарсек. При этом принималось, что это последние 500 млн лет эволюции, так как при более раннем эпизоде аккреции картина успеет измениться вследствие процессов звездообразования и диффузии, а мы можем наблюдать только в современную эпоху. За это время галактический диск успеет сделать два оборота вокруг центра, то есть аккреция происходит по кольцу, на фиксированном азимутальном угле приток был дважды. В результате, для фиксированного азимутального угла получается следующий результат: ни на газовой плотности, ни на распределении металличности, эффект не заметен. Результат идентичен показанному на рисунке 4. Аккреция в область меньшего радиуса к качественным изменениям не приведет.

Проявление аккреции может быть заметным только в том случае, если приток массы 10^8 M_0 происходит не равномерно по кольцу, а в виде, например, сотни фрагментов массой 10^6 M_0, характерный размер которых 50 пк. Как видно на рисунке 6, на распределении газовой плотности формируется область с избытком газа, а на распределении металличности формируется область пониженной металличности. Но полученная металличность не равна металличности аккрецируемого облака, которая равна $[O/H] = -1 \, дек$, так как в наших расчетах предполагается мгновенное перемешивание металлов в области аккреции и последующее перераспределение вследствие диффузии с окружающими областями. Расчеты показывают, что особенности распределения газовой плотности и металличности сгладятся примерно за миллиард лет.

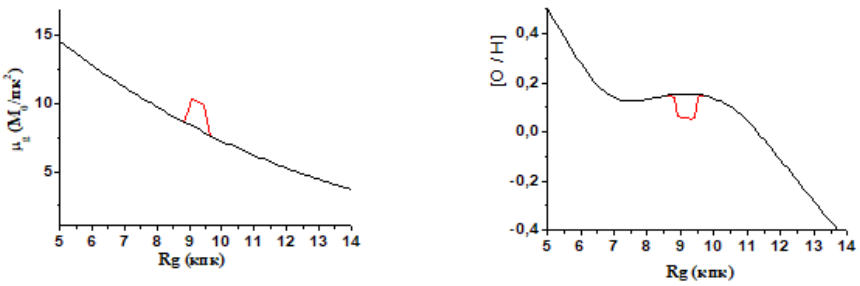


Рисунок 6. Результаты численного моделирования проявления аккреции газового потока массой 10^8 M_0, если аккреция происходит в виде фрагментов массой 10^6 M_0 и характерным размером 50 пк. Слева – радиальное распределение газовой плотности. Справа - радиальное распределение

содержания металлов в газовой среде. Графики черного цвета – без учета притока облака, красного цвета – с учетом притока облака в область от 9 до 9,5 кпк.

Выводы

В исследовании проведено численное моделирование процесса аккреции газа на диск Галактики. В результате расчетов получены следующие результаты.

Приток единичного высокоскоростного облака в диск не приведет к заметному понижению металличности газа в области аккреции.

Аккреция газа захваченной карликовой галактики, для наблюдаемых параметров процесса, сформирует область пониженной металличности только в том случае, если аккрецию рассматривать в виде притока массивных фрагментов. Получившиеся в результате аккреции особенности сгладятся примерно за миллиард лет.

Молодые звездные объекты, металличность которых существенно ниже металличности окружения, образовались из материала высокоскоростных облаков, не разбавленного веществом галактического диска.

так как 1) аккреция происходит в большом интервале значений азимутального угла, 2) за время аккреции успевают проявиться процессы звездообразования в аккрецируемом газе с последующими взрывами сверхновых – пставщиками тяжелых элементов, 3) процессы диффузии металлов в газе приводят к выравниванию концентрации металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lockman F.J., Benjamin R.A., Heroux A.J., Langston G.I. Smith’s Cloud: a High-velocity Cloud Colliding with the Milky Way // Astrophys. J. 2008. Vol. 679. P. 21
2. Park G., Koo B.-C., Kang J., et al. A High-velocity Cloud Impact Forming a Supershell in the Milky Way // Astrophys. J. Lett. 2016. Vol. 827. P. 27
3. Gozha M.L., Koval’ V. V. and Marsakov V.A. Heterogeneity of the population of open star clusters in the Galaxy // Astron. Lett. 2012. Vol 38. P 519
4. Sung H., Bessell M., Song I. The Sejong Open cluster Survey (SOS) VI. A small star-forming region in the high Galactic latitude molecular cloud MBM 110 // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2019. Vol. 486, P. 3473
5. Mackereth J.T., Bovy J., Schiavon R.P. et al. The age-metallicity structure of the Milky Way disc using APOGEE // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2017. Vol. 471, P. 3057
6. Tinsley B.M. Evolution of the Stars and Gas in Galaxies // Fundamentals of Cosmic Physics. 1980. Vol. 5. P. 287
7. Lacey C., Fall S. Chemical evolution of the galactic disk with radial gas flows // Astrophys. J. 1985. Vol. 290. P. 154
8. Schmidt M. The rate of star formation. II. The rate of formation of stars of different mass // Astrophys. J. 1963. Vol. 137. P. 758-769.
9. Salpeter E. The Luminosity Function and Stellar Evolution // Astrophys. J. 1955. Vol. 121. P. 161
10. Acharova I.A., Gibson B.K., Mishurov Yu.N. Galactic constraints on supernova progenitor models // Astron. and Astrophys. 2013. Vol. 557, A107
11. Иллюстрация NRAO/AUI/NSF, Leiden-Argentine-Bonn Survey, Parkes Observatory, Westerbork Observatory, Arecibo Observatory, Robert Nemiroff / MTU, Jerry Bonnell / USRA https://apod.nasa.gov/apod/ap980216.html
12. Иллюстрация NRAO/AUI/NSF, Leiden-Argentine-Bonn Survey, Parkes Observatory, Westerbork Observatory, Arecibo Observatory, Robert Nemiroff / MTU, Jerry Bonnell / USRA https://apod.nasa.gov/apod/ap980216.html

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-204-213

Желенкова Ольга Петровна (1,2), Витковский Владимир Валентинович (1,2),
Черненков Владимир Николаевич (1), Ягодка Сергей Аанатольевич (1),
Пляскина Татьяна Анатольевна (1), Шергин Владимир Сергеевич (1),
Малькова Галина Александровна (1), Величко Алексей Михайлович (1)

1. – Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук,
2. – Университет ИТМО

ПРОТОТИП ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО ХРАНИЛИЩА ДЛЯ АРХИВА ЦИФРОВЫХ КОЛЛЕКЦИЙ

Аннотация. *В работе рассматриваются проблемы, которые связаны с долговременной сохранностью экспериментальных данных — наблюдений, полученных на телескопах САО РАН. В качестве решения проблем обеспечения надежного хранения информации, масштабирования аппаратного и архивного содержимого, доступа и интерпретации данных предлагается прототип программного постоянного хранения данных на основе специализированного бесплатного программного обеспечения iRODS.*

Ключевые слова. *Цифровая коллекция, долговременное хранение информации, программно-определяемое хранилище, информационно-телекоммуникационная инфраструктура, виртуальная обсерватория.*

Annotation. *In the paper we consider problems that are associated with the long-term preservation of experimental data - observations obtained with telescopes of the SAO RAS. As a solution to the problems of ensuring reliable information storage, scaling hardware and archive content, access and data interpretation, a prototype software-defined persistent data storage based on the specialized free software iRODS is proposed.*

Keywords. *Digital collection, long-term data storage, software-defined storage, information and telecommunications infrastructure, virtual observatory.*

Введение

С конца 20-го века кардинально изменились способы получения астрономических данных - кроме расширения набора регистрируемых диапазонов электромагнитного излучения от небесных объектов, все больше наблюдательного времени телескопов используется для проведения обзоров больших по площади областей неба. Это ведет к экспоненциальному росту объемов научных данных.

В 2002 г., когда потребовалось объединение географически разнесенных ресурсов и центров данных в единую информационно-телекоммуникационную инфраструктуру - виртуальную обсерваторию (ВО), был создан альянс IVOA (International Virtual Observatory Alliance, http://www.ivoa.net) для координации международного астрономического сообщества в разработке архитектуры и стандартов ВО. Стандарты IVOA, базирующиеся на стандартах W3C (World Wide Web Consortium, http://www.w3.org) и учитывающие специфику предметной области, служат основой для разработки программных систем ВО, предназначенных для доступа, анализа и визуализации астрономических данных. Любой архив наблюдений должен обеспечивать свободный доступ к наблюдательным данным (резолюция No.B1 XXV Генеральной ассамблеи МАС, https://www.iau.org/administration/resolutions/general_assemblies) и совместимость со стандартами ВО (http://ivoa.net/documents/index.html). Этим определяется выбор форматов данных и сервисов при архивировании данных, и даже влияет на технологию наблюдательного процесса.

Постоянное архивное хранение — это поддержка коллекций данных в течение десятков лет, а еще лучше — без ограничения по времени. Это требует обязательного хранения вместе с файлами цифровой коллекции описание ее организации и метаданные, которые позволяют интерпретировать информацию. Постоянный архив должен обеспечивать обнаружение, доступ и отображения цифровых объектов, которые в нем хранятся, в то время как технологии хранения меняются. Устаревание носителей информации в сочетании с большими объемами данных может сделать проблему постоянного хранения почти нерешаемой.

Долговременное хранение наблюдений входит в компетенцию обсерваторий. С 2004 г. в альянсе IVOA функционирует специальная рабочая группа DCP (Data Curation and Preservation, http://wiki.ivoa.net/twiki/bin/view/IVOA/IvoaDCP) по сопровождению архивов и долгосрочному хранению астрономических данных, где обсуждаются принципы организации астрономических архивов, принимаются рекомендации по использованию и разработке стандартов.

Есть ряд стандартов, которые связаны с поддержкой и обеспечением архивного хранения. Так следующие разработанные ISO (International Organization for Standardization, http://www.iso.org) и CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems, http://public.ccsds.org) стандарты применимы ко всем архивам и не являются специализированными для какой-либо научной дисциплины: ISO 14721:2012 – эталонная модель для открытой информационной архивной системы RM OAIS (Reference Model for an Open Archival Information System), ISO 20104:2015 – стандарт интерфейса между поставщиками данных и архивами PAIS (Producer-Archive Interface Specification), ISO 13527:2010 – XFDU (XML Formatted Data Unit structure and construction rules) описание данных и метаданных на основе XML и др.

В эталонной модели OAIS уже заложено, что провайдер поддерживает долгосрочное хранение архивной информация, то есть такой достаточно продолжительный интервал времени, когда уже надо учитывать изменения в технологиях хранения - носители и форматы данных, включая и новые потребности сообщества пользователей. Эталонная модель OAIS определяет набор функций, обеспечивающих весь жизненный цикл архивных данных - получение, хранение, доступ и управление файлами. Это также относится к миграции цифровой информации на новые носители и в новые форматы, изменениям в модели данных для представления контента, к обмену цифровой информацией между архивами. RM OAIS определяет внутренние и внешние интерфейсы к функциям архива. В ней определяется как минимальный, так и максимальный набор требований для OAIS-архива.

В IVOA DCP наиболее подходящим для астрономических архивов считается стандарт OAIS. Однако приведение архивной системы к нему требует значительных затрат, наличия оборудования и специалистов.

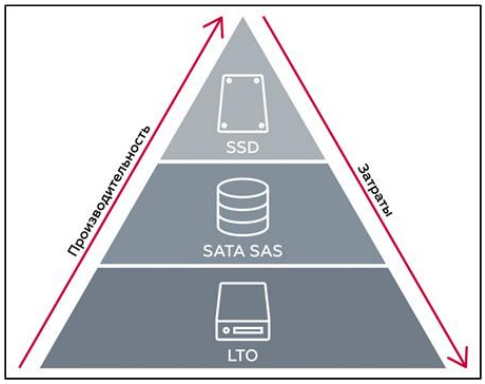


Рис. 1. Многоуровневое хранилище (рис. из [1]), первый уровень – SSD, второй – HDD, третий уровень — ленточные библиотеки

Современным решением для архитектуры постоянного архива считается организация многоуровнего хранилища [1]. Так, при трёхуровневой архитектуре на первом слое

используются быстрые твердотельные накопители SSD (solid-state drive), на втором — жесткие диски или библиотеки жестких дисков с интерфейсами SATA (Serial Advanced Technology Attachment) или SAS (Serial Attached Small Computer System Interface) и на третьем — библиотеки с ленточными накопителями, удовлетворяющими стандарту LTO (Linear Tape-Open, https//www.lto.org). Наиболее востребованные данные или те, к которым предъявляются жесткие требования по времени доступа, располагаются на верхнем уровне хранилища, менее востребованные данные находятся на жестких дисках, а те, надобность в которых возникает редко, хранятся на самом нижнем уровне этой иерархии (рис. 1). Все процессы управления файлами должны быть автоматизированы - для пользователей не имеет значения, где размещаются нужные данные. Единственное, что можно заметить, — разная скорость получения данных.

Программно-определяемое хранилище (Software-Defined Storage, SDS) [2] – быстро развивающаяся технология, где программное обеспечение управляет ресурсами хранения, что позволяет хранить данные на неспециализированном оборудовании под управлением операционных систем общего назначения (Linux, Windows, FreeBSD). ПО обеспечивает гибкую организацию данных, а также дедупликацию и репликацию данных, динамическое выделение емкости, снимки данных, соблюдение политик хранения.

Такое хранилище предоставляет следующие преимущества: независимость от аппаратного оборудования - вся логика хранения данных реализуется с помощью программного обеспечения, масштабируемость, низкая стоимость решений – для организации хранилища используются серверы или простые системы хранения данных, причем требования к производительности аппаратных средств невысоки. На простом и недорогом оборудовании с помощью ПО получается хранилище с хорошими функциональными возможностями и практически неограниченным масштабированием.

Решения на базе SDS позволяют также организовать иерархию хранимых данных с распределением файлов на серверах хранения между жесткими дисками с различными характеристиками. Доступ к данным может предоставляться как на файловом/блочном уровне, так и на объектном.

Стоимость решений на базе технологии программно-определяемого хранилища (SDS) относительно невысока. Такие решения целесообразны, когда необходимо произвести изменения в ИТ-инфраструктуре, а также, если в ней много оборудования, которое функционально не вполне соответствует стоящим задачам, но для программно-определяемого хранилища вполне подходит.

Специализированное программное обеспечение для архивов постоянного хранения

Существует ряд специализированных программных систем – программное обеспечение для распределенных файловых систем (Ceph, Google File System, General Parallel File System, Lustre и др.) и для постоянных архивов (Archivematica, RODA, iRODS и др.), на базе которых возможна организация программно-определяемого хранилища.

Система iRODS (integrated Rule-Oriented Data System, http://irods.org) - программная платформа с открытым кодом для хранения, поиска и обмена файлами, которую разрабатывает и поддерживает Консорциум iRODS. Множество организаций по всему миру используют архивные системы на базе iRODS, имеются реализации архивов наблюдений на ее основе [3]. iRODS поддерживает RM OAIS, обладает набором средств для гибкой настройки политик управления данными, поддерживает разнородные инфраструктуры хранения информации, использует СУБД (PostgreSQL, MySQL) и операционные системы (SentOS, Ubuntu).

Каждое развертывание iRODS (рис. 2), называемое зоной, включает iCAT - базу данных с метаданными, которая содержит информацию об объектах, пользователях и других зонах. Объектами (файлы или папки) можно управлять как с помощью командного интерфейса iCommands с Unix-подобными командами, так и веб-приложением iDROP. Механизм правил и

микросервисы являются двумя важными компонентами iRODS. Правила определяют операции, которые выполняются при определенных условиях. Микросервис — функция, производящая некоторую операцию. Правила и микросервисы могут быть объединены в цепочку для выполнения нужной последовательности действий с объектами данных. Администратор может использовать iRODS поверх существующей разнородной инфраструктуры данных, контролировать как доступ к данным, так и состояние зоны. Каждый сервер может иметь свой собственный набор политик, правил и плагинов. Сервер-поставщик поддерживает соединение и связывается через базу данных iCAT. Потребительские серверы также связываются с iCAT, подключаясь через поставщика данных.

Таким образом, iCAT - единственная точка входа в зону. В зоне может быть несколько серверов-потребителей, что повышает производительность, безопасность и отказоустойчивость зоны. iRODS поддерживает виртуальную файловую систему. Файлы хранятся в виде объектов данных. Для каждого файла в iCAT сохраняется путь к его расположению на физическом устройстве и путь в виртуальной файловой системе iRODS (рис. 2, справа). Компонуемые ресурсы iRODS разделяются на два типа — координирующие и ресурсы хранения. Последние управляют конкретным типом носителя (диск, лента и т. д.), путь к которому сохраняется в в iCAT. Виртуализация позволяет координирующим ресурсам управлять размещением и извлечением объектов независимо от типа ресурсов хранения.

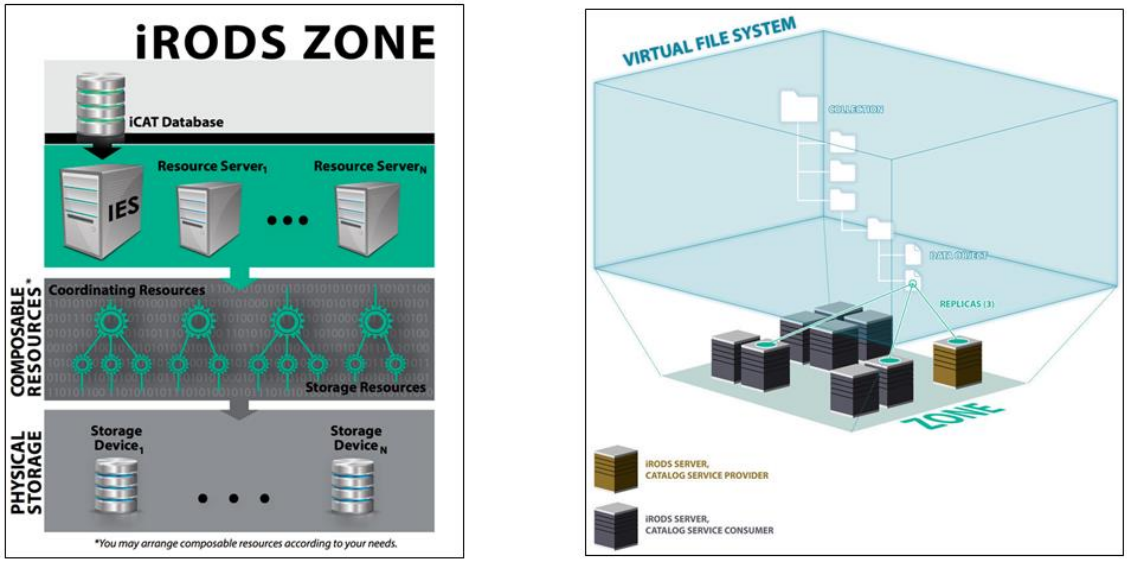


Рис. 2. Слева - структура зоны iRODS (http://slides.com/irods/sc15-workshop#/2/6); справа - .виртуальная файловая система iRODS.

Проблемы долговременного хранения цифровых данных

При считывании, записи и хранении цифровых данных могут возникнуть ошибки, ведущие к потере информации. Несмотря на то, что надежность устройств растет, ошибки, возникающие при чтении/записи, можно контролировать программно, срок службы устройств чтения/записи составляет по оценкам 5-10 лет, что меньше срока службы самих носителей информации. Распознавание самих цифровых файлов еще зависит и от применяемого программного обеспечения, жизненный цикл которого оценивается в 5–7 лет. Из этого следует, что при долгосрочном хранении необходимо отслеживать состояние архивного хранилища и периодически переписывать данные на новые носители.

По литературным обзорам [4–8] приводим характеристики цифровых носителей, используемых для архивного хранения и резервного копирования.

Оптические диски. Единственным носителем, который полностью поддерживает важную для архивного хранения стратегию WORM (Write One, Read Multiple), является оптический диск. По своим характеристикам он полностью соответствует этим требованиям:

сохранность и неизменность данных, быстрый поиск и прямой доступ. При этом сами носители энергонезависимы и не подвержены влиянию электромагнитных полей. Стандарты оптических носителей совместимы между собой - CD-диск читается и на современных DVD и Blu-Ray дисководах. Существующие правила разработки будущих форматов дают определенную надежду на то, что оптический диск будет читаться новыми устройствами и через десятилетия. Оптические диски способны хранить информацию много лет без риска ее повреждения. Для создания больших по объему архивов лучше всего подходят роботизированные библиотеки на дисках Blu-Ray [8]. Три основных аргумента, которые можно привести в их пользу: низкое энергопотребление – 1/30 от энергопотребления аналогичных по емкости жестких дисков; цена хранения информации в два раза ниже по сравнению с HDD; долговечность хранения данных (50+ лет) – во время операций чтения/записи слой с информацией не подвергается механическому воздействию.

Емкости роботизированных библиотек, имеющих определенные физические габариты, могут возрасти в несколько раза при появлении оптических дисков большой емкости. Немаловажно, что библиотеки могут читать оптические диски меньшей емкости - 100 ГБ, 4.7 ГБ (используются с 1996 г.) и даже 650 МБ (появились в 1982 г.). Высокая скорость передачи данных обеспечивает оперативный доступ к данным. Архивный накопитель на оптических дисках позволяет найти любой хранящийся документ в пределах 5-6 секунд.

Благодаря надежности оптические носители можно использовать как для организации offline-хранения информации или «глубокого» архива, так и для создания резервных копий данных.

Магнитные ленты. Цена за хранения 1 ГБ для магнитных лент (МЛ) остается самой низкой среди всех цифровых носителей. Максимальная скорость передачи данных для современных ленточных устройств составляет 64 Гб/с, а для дисковых устройств — 80 Мб/с. Для больших по объемам хранилищ используются ленточные библиотеки, которые могут работать одновременно с большим количеством картриджей. В них используются различные интерфейсы для передачи данных (SAS, SCSI, FC), а также приводы, использующие стандарт записи LTO. Для пользователя такая библиотека выглядит как один большой накопитель данных. Ленточная библиотека - эффективная система для автоматизированного резервного копирования данных любого типа с возможностью их последующего экстренного восстановления.

Жесткие диски. Диски остаются востребованными устройствами для оперативного хранения архивной информации. Дисковый массив обеспечивает высокую доступность, а также возможности горячей замены. В них можно повысить скорость доступа к данным с применением кэш-памяти, технологии RAID, с оптимизацией доступа к дисковому массиву.

Архивная система обсерватории

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН) образована в 1966 г. для обеспечения работы оптического телескопа БТА и радиотелескопа РАТАН-600, тогда крупнейших в мире астрономических инструментов. С 80-х годов прошлого века регистрация данных, получаемых на радиотелескопе РАТАН-600 и на оптическом телескопе БТА, стала производиться в цифровом виде, что послужило толчком к разработке концепции архива обсерватории [9] и созданию архива наблюдений на магнитных лентах – на тот момент единственного цифрового носителя, способного вместить большой объем информации.

За время своего существования архив прошел несколько этапов модернизации [10-13], обусловленных как изменениями в способе хранения данных (от магнитных бобинных лент, дат-кассет, стриммерных лент к HDD и оптическим дискам), так и в представлении информации и требованиями к сервисным функциям. Разработка и реализация информационно-поисковой системы (ИПС) общего архива наблюдений САО РАН проводилась поэтапно. В 1999-2000 гг. был разработан прототип ИПС с применением системы управления базами данных (СУБД)

Oracle для небольшого архива радионаблюдений [10]. Затем была реализована первая версия ИПС, где выполнялись запросы по дате наблюдений для выбранного локального архива, просматривались заголовки и содержимое файлов, производилось копирование данных по http-протоколу,. В следующей версии [11, 12] был расширен набор запросов 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.

В общем архиве обсерватории 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. Сама архивная система состоит из трех взаимосвязанных подсистем - каскадная система архивизации, хранилище и ИПС, обеспечивающая поиск и веб-доступ к файлам.

Каскадная система архивизации включает пять уровней. Так, первый уровень - компьютер системы сбора, где накапливается информация, полученная в течение серии или сета наблюдений. По завершению наблюдательного сета файлы с наблюдениями копируются в соответствующий каталог выделенного файл-сервер - второй уровень архивизации. Когда данных накапливается достаточно по объему, администратор записывает информацию на оптический диск, куда помещаются наблюдения, сервисные файлы, используемые для коррекции инструментальных ошибок, журналы наблюдений, сопутствующая информация, подготовленная наблюдателем. Этот диск входит в состав offline-хранилища, которое обеспечивает долгосрочную сохранность неизменяемых данных. На текущий момент сюда входит 300 оптических CD/DVD дисков и такое же количество дубликатов. Доступ к оптическим дискам разрешен только администратору архива.

Оперативное или online-хранилища обеспечивает функциональность ИПС. Оно организовано на дисковом массиве, где в каталог PRIME скопированы без изменений все оптические диски offline-уровня, а в каталог DATA записано содержимое этих же дисков, но уже обработанное программами-фильтрами, чтобы именование и структура каталогов и файлов соответствовала правилам, принятым в архиве. Поддерживается три категории пользователей с разным набором привилегий при работе с ИПС — пользователь, ответственный наблюдатель и администратор архива.

Оперативное хранилище имеет две копии, одна располагается на выделенном сервере ИПС общего архива, вторая – на тестовом сервере (пятый уровень системы архивизации), где проводится разработка и тестирование программного обеспечения архива. Таким образом в архивном хранении мы имеем четыре копии неизменяемых данных (две копии - на оптических дисках и две копии — на дисковых массивах двух серверов) и две копии данных (на дисковых массивах двух серверов), реструктурированных согласно правилам ИПС.

Объем архивных данных в оперативном хранилище порядка 4 ТБ (2ТБ - на рабочем сервере ИПС и копия данных 2ТБ — на тестовом сервере), общее число файлов - около 4 млн (2+2). На текущий в момент архиве поддерживается 20 локальных архивов с необработанными данными, три локальных архива с прямыми снимками, где размещены данные с выполненной координатной калибровкой и исправленными FITS-заголовками, и два архива с выделенными на прямых снимках небесными объектами (https://www.sao.ru/oasis/cgi-bin/fetch?lang=ru).

В архиве оптические наблюдения хранятся в стандартном астрономическом формате FITS (Flexible Image Transport System) [14, 15], радионаблюдения - в сходном по структуре с FITS формате RFLEX [16], а также текстовые вспомогательные файлы и таблицы в формате CSV (Comma Separated Value).

В обсерватории есть три центра данных, разнесенных географически. Один находится на верхней научной площадке (ВНП), где располагаются оптические телескопы, второй — на

радиотелескопе РАТАН-600, третий — нижняя научная площадка (ННП), где располагается основной центр данных и находится архив наблюдений.

Количество пользователей архивной системы оценивается в одну-две сотни человек. К ним отнесены сотрудники обсерватории и сторонних организаций, которые выполняют наблюдения на телескопах САО РАН. Размер получаемых файлов - сотни килобайт на радиотелескопе и несколько мегабайтов на оптических телескопах. Количество файлов, получаемых за ночь наблюдений для оптических телескопов, – десятки-сотни, для радиотелескопа за сутки наблюдений - несколько сотен.

Потребность в модернизации архивной системы. В конце 90-х была разработана концепции банка астрономических данных (БАД) обсерватории, который должен был объединить наблюдательные данные, астрономические каталоги, цифровые обзоры, технические документы, статьи. Реализация веб-доступа к разнородным электронным коллекциям и объединение информационных ресурсов обсерватории - задачи интегрированного банка данных (ИБД) [17], который развивает концепцию БАД с учетом современных информационных и компьютерных технологий. В этом контексте общий архив наблюдений является частью ИБД САО РАН.

Долговременное хранение данных является необходимым условием для анализа длинных рядов наблюдений - исследования долгопериодичной переменности небесных объектов, а также поиска транзиентных событий и обнаружения неизвестных ранее явлений. С введением в обсерватории большеформатных и мозаичных светоприемников, с повышением временного разрешения на радиометрических комплексах и переходом на новые стратегии наблюдений - проведение обзоров неба как на оптических, так и на радиотелескопе - потоки данных от телескопов существенно возрастут.

В русле современных тенденций в астрономии при работе с данными состав и функциональность архивной системы должны обеспечивать:

1. актуализацию существующих ресурсов, что включает пополнение коллекций и коррекцию ошибочных данных;
2. приведение разномодельных спецификаций ресурсов к общему языку - унифицированной модели данных;
3. расширение архивной системы - включение в состав архива астрономических каталогов, используемых в обсерватории в наблюдательном процессе;
4. добавление новых цифровых коллекций наблюдений, пользовательских архивов (цифровых коллекций, подготовленных пользователями для свои научных задач);
5. выполнение первичной обработки данных - подготовку сервисных файлов, используемых в первичной обработке для коррекции инструментальных ошибок, координатную привязку прямых снимков;
6. свободный доступ к данным;
7. расширение функциональности в выполнении сложных запросов, в пользовательском интерфейсе;
8. использование стандартов IVOA для передачи результата поиска в таблицах, изображениях, спектрах и др., включая и публикацию соответствующих сервисов архива в реестрах ВО (https://wiki.ivoa.net/twiki/bin/view/IVOA/PublishingInTheVO?redirectedfrom=IVOA.PublishingInTheVONew);
9. соответствие RM OAIS и, возможно, еще другим архивным стандартам - METS (Metadata Encoding & Transmission Standard, http://www.loc.gov/standards/mets), EAD (Encoded Archival Description, https://www.loc.gov/ead), SKOS (Simple Knowledge Organization System, https://www.w3.org/2004/02/skos/), DC (Dublin Core, https://www.dublincore.org), PREMIS (Preservation Metadata Implementation Strategies, https://www.loc.gov/standards/premis);

10. планируемые частичную или полную миграцию данных, включая переход на другие форматы хранения, которые приняты астрономическим сообществом — VOTable (Virtual Observatory table format, www.ivoa.net/documents/VOTable/20091130/REC-VOTable-1.2.html) или HDF5 (Hierarchical Data Format, https://www.hdfgroup.org/);
11. поддержку увеличивающегося объема данных как при продолжающемся накоплении уже существующих локальных архивов, так и при добавлении новых коллекций, включая и хостинг цифровых коллекций других телескопов, - архив должен быть легко масштабируемым;
12. долговременную сохранность необработанных наблюдений и результатов их анализа - координатные, фотометрические и темпоральные характеристики с целью извлечения значимой для исследований информации;
13. поддержку роста количества обращений к архивным данным.

Свободный доступ к данным, надежное хранение, реализация набора запросов, добавление новых локальных архивов обеспечивается существующей архивной системой, но чтобы архив соответствовал современному уровню, необходимо провести его модернизацию. Рассматривая наличие аппаратных средств и увеличивающийся поток данных, мы приняли решение организовать программно-определяемое хранилище на базе программной платформы iRODS.

Прототип программно-определяемого хранилища для архивной системы обсерватории

С точки зрения материальных затрат невыгодно создавать дата-центр с нуля и приобретать достаточно дорогие системы хранения данных - ленточные библиотеки или библиотеки оптических дисков. На текущий момент объем данных, получаемых обсерваторией, составляет сотни мегабайт в сутки. Обеспечить хранение такого объема данных можно существующими ресурсами, но для унификации и виртуализации хранилища необходимо привлекать специализированные программные средства — систему iRODS, о которой говорилось выше. Архив обсерватории — небольшой по объемам, потокам информации и количеству запросов центр данных. И то, что считают «узким горлом» iRODS — одна точка входа в систему — база данных iCAT, через которую производятся обращения к данным, в нашем случае не является ограничением.

Из рассмотренных цифровых носителей, если принимать во внимание текущую обеспеченность оборудованием архива, самым подходящими для хранения являются оптические диски (CD-R, DVD+R), которые и используются для хранения наблюдений. В будущем необходимо планировать миграцию на более надежные и большей емкости диски, предназначенные именно для архивного хранения (архивные BD и диски долговременного хранения M-DISK).

В обсерватории имеются три центра данных, разделенных географически. Один находится на верхней научной площадке (ВНП), где располагаются оптические телескопы, второй — на радиотелескопе РАТАН-600, третий — нижняя научная площадка (ННП), где располагается основной центр и находится архив наблюдений. В зоне iRODS такое географически разнесенное положение автономно функционирующих центров полагает развертывание трех зон iRODS, федеративно связанных между собой. Схема архивизации, которая используется в обсерватории, естественным образом находит отображение в архитектуре, состоящей из нескольких слоев ресурсов. Так на самом нижнем уровне происходит сбор наблюдательных данных на компьютерах систем сбора (ресурсы хранения), второй уровень - файл-сервер телескопа (координирующий ресурс/ресурс хранения), третий уровень (координирующий ресурс/ресурс хранения) – оперативное хранилище ИПС. Поскольку получаемые данные распределены по устройствам хранения компьютеров систем сбора, то необходимы несколько серверов ресурсов и надежное дерево компонуемых ресурсов.

Поскольку центры данных обсерватории существуют автономно, возможны ситуации, когда один из них не доступен по причине отключения электроэнергии или аварии на линии связи. В таких случаях для поддержки доступности данных также необходима определенная стратегия репликаций.

Внедрение возможностей iRODS в архивную систему рационально начинать не в полном объеме той схемы, которая вытекает из существующей схемы потоков данных от систем сбора к постоянному хранилищу, а поэтапно - от простого к более сложному. Платформа iRODS является универсальной для поддержки разных постоянных архивов, что влечет за собой определенный уровень сложности при конфигурировании системы.

Предлагаются следующие этапы внедрения iRODS в действующую архивную систему:

a. создание зоны iRODS на ННП с поддержкой двух слоев, где в качестве ресурса хранения выступает файл-сервер ВНП. Это включает следующие работы:
   - развертывание зоны на сервере общего архива ННП,
   - организация ресурсного сервера на файл-сервере ВНП,
   - разработка микросервисов для сканирования выделенных каталогов на предмет появления новых файлов, при появлении — копирование в выделенную область сервера архива, контроль занимаемого объема для подготовки записи на оптического диска;

b. реализация в зоне iRODS на ННП двух слоев компонуемых ресурсов — компьютеры систем сбора и файл-сервер ВНП и координирующего ресурса:
   - конфигурирование ресурсов хранения iRODS на компьютерах систем сбора телескопа БТА,
   - выбор типа координирующего ресурса и его создание на файл-сервере,
   - создание ресурса хранения/координирующего ресурса на сервере общего архива,
   - настройка политик дерева составных ресурсов. Отметим, что не запрещается размещение ресурса хранения и координирующего ресурса на одном сервере;

c. две зоны iRODS — ННП и РАТАН-600 с трехслойной архитектурой:
   - развертывание зоны iRODS на сервере радиотелескопа,
   - ресурсы хранения iRODS на компьютерах радиометрических комплексов РАТАН-600,
   - ресурс хранения/координирующий ресурс на сервере РАТАН-600,
   - настройка политик дерева составных ресурсов,
   - взаимодействие зон ННП и РАТАН, настройка политик репликации;

d. организация трех зон iRODS на ННП, ВНП и РАТАН-600:
   - развертывание зоны iRODS на сервере общего назначения БТА,
   - ресурс хранения/координирующий ресурс на сервере БТА с базой данных iCAT,
   - взаимодействие зон ННП, ВНП, РАТАН, настройка политик репликации.

На последнем этапе полностью отображается вся схема потоков данных от систем сбора к архивному хранилищу.

Для освоения функциональности платформы iRODS на сервере ИПС общего архива (ОС SciLinux 6.1, СУБД PostgeSQL 8.4, iRODS 4.2.2) развернута зона iRODS. Запущено клиентское веб-приложение iDROP на базе сервера приложений Tomcat. Опробованы функции iCommands — клиента командной строки, а также функциональность веб-приложения, рассмотрены особенности политик управления данными для разных типов координирующих ресурсов. Для реализации микросервисов требуется хороший уровень программирования, для этих целей предложено использовать Python, который встроен плагином в iRODS.

Благодарности

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований No 17-07-01367.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балалайкин Е., PCweek, https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php?ID=194209, 10.04.2017.
2. Новиков И., itWeek, https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php?ID=196453, 24.07.2017.
3. Seaman R., arXiv:1410.3481v1, 2014, 11pp.
4. Коленченко О., https://www.ferra.ru/review/computers/evolution-punch-cards-magnetic-disks-floppy-cd-dvd-part-1.htm, 21.10.2014.
5. Коленченко О., https://www.ferra.ru/review/computers/ evolution-hdd-blu-ray-hd-dvd-flash-nor-nand-ssd-part-2.htm, 29.10.2014.
6. Левин Л., Директор информационной службы, http://www.osp.ru/cio/2015/09/13047655, т. 09, 02.11.2015.
7. Пилипчук М.И., Балакирев А.Н., Дмитриева Л.В., Залаев Г.З. Рекомендации по выбору оптических дисков для хранения архивных документов/ – М.: РГАНТД, 2011.- 79 с.
8. Митин В., itWeek, https://www.itweek.ru/infrastructure/article/detail.php? ID=179684, 06.11.2015.
9. Кононов В.К., Моносов М.Л., Витковский В.В., Липовецкий В.А., Сообщения САО, 1990, т. 65, 32-44.
10. Vitkovskij V., Chernenkov V., Kalinina N., et. al, Baltic Astronomy, 2000, 9, 578-582.
11. Витковский В.В., Желенкова О.П., Малькова Г.А. и др., Bulletin SAO, 2005, т. 58, 52-63.
12. Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А. и др., Препринт САО РАН, 2007 N219, 37с.
13. Желенкова О.П., Витковский В.В., Пляскина Т.А., Труды совещания «Международная виртуальная обсерватория - итоги первого десятилетия», Электронные библиотеки, 2010, т. 13, вып. 4.
14. Wells, D.C.; Greisen, E.W.; Harten, R.H., Astronomy and Astrophysics Supplement, 1981, Vol. 44, P. 363.
15. Витковский В.В., Желенкова О.П., Рядченко В.П., Шергин В.С., Сообщения САО, 1988, т.59, с.60-67.
16. О.В. Верходанов, В.В. Витковский, Б.Л. Ерухимов, О.П. Желенкова, О.П. Лихван, М.Л. Моносов, В.Н. Черненков, В.С. Шергин. Препринт САО РАН. СПбФ, 1993, No 89СПб,18-30.
17. Vitkovskij, V. Baltic Astronomy, 1997, v.6, p.327

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-214-222

Черненков Владимир Николаевич

Специальная астрофизическая обсерватория РАН

IPV6 – КАК СРЕДСТВО САМООРГАНИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ САО РАН.

Аннотация.*В докладе изложены требования к современной компьютерной сети научной организации, в частности, локальной сети Специальной Астрофизической обсерватории Российской Академии наук (САО РАН). Определен выбор направления в развитии базовых средств обеспечения наблюдательного процесса, основанных на сервисах в локальной сетевой инфраструктуре САО. Это поможет автоматизировать административное сопровождения сети, исключит влияние человеческого фактора на ее надежность и упростит ее обслуживание. Показана перспективность использования интернет-протоколов шестой версии – IPv6, взамен и в дополнение к IPv4, для осуществления преимущественно "безлюдного" административного сопровождения сетей, минимизирующего ошибки ручного режима. Предложено развитие мультиплатформенной сети с помощью перспективных технологий, поддерживаемых IPv6, обеспечивающих внедрение практически самонастраеваемой конфигурации. Описаны способы клиент-серверной реализации основных сетевых сервисов обсерватории.*

Ключевые слова:*Интернет – локальная сеть – IPv6 – автоматизация научных исследований – ZeroConf*

Annotation. *The report outlines the requirements for a modern computer network of a scientific organization, in particular, the local network of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS). The choice of direction in the development of basic tools to ensure the observation process, based on services in the local network of the SAO RAS, has been determined. This will help automate the administrative maintenance of the network, eliminate the influence of the human factor on its reliability and simplify its maintenance. The prospect of using Internet protocols of the sixth version - IPv6, instead of and in addition to IPv4, is shown for the implementation of a mostly "unmanned" administrative support of networks that minimizes manual mode errors. The proposed development of a multiplatform network with the help of promising technologies supported by IPv6, ensuring the introduction of a practically self tuned configuration. The methods of client-server implementation of the main network services of the observatory are described.*

Введение.

В САО РАН сетевые технологии для автоматизации наблюдений и сбора данных активно начали внедряться с 1986 года, а IP (Internet Protocol) практически сразу с появлением недорогих телефонных модемов и широкополосных сетевых адаптеров для персональных компьютеров (ArcNet, Ethernet) в начале 90-х[1].

В 2018 году исполняется 20-летие с момента публикации[3] современной редакции интернет протокола шестой версии – IPv6. Тем не менее не теряет актуальности обоснование замены им IPv4, пока доминирущего в обеспечении ресурсов глобального Интернет. Целью настоящей работы является исследование применимости IPv6 для решения задач планомерного развития и сопровождения сетей обсерватории. Казалось бы, что развитие сети обсерватории является рутинной инженерной задачей. Однако выбор направления в развитии ее технологической основы важен для разработки базовых методик наблюдательного процесса, научной аппаратуры, серверов обработки наблюдательных данных и программных продуктов,

основанных на сетевых технологиях и глубоко интегрированных в соответствующие сервисы. Требуется тщательное изучение и тестирование этих средств и сервисов, чтобы их использование не привело к усложнению получения, переноса, обработки или искажению научных данных. Следование мировой тенденции внедрения перспективных технологий является необходимой мерой поддержания востребованности научной инструментальной базы и наблюдательных архивов САО РАН.

Общие технические требования к IP-сети обсерватории.

Область исследования сетевых технологий и их применимости определяются техническими требованиями, накладываемыми на сеть научно-исследовательской организации. Перечислим основные из них:

1. Производительность сети должна быть согласована с потоком наблюдательных данных, передаваемых по сети в процессе их получения, архивизации, обработки и, по-возможности, соответствовать современному состоянию в мировой практике.
2. Структура сети должна обеспечивать простоту переноса научного оборудования (компьютеров), в первую очередь такого, которое управляется по сети удаленно.
3. Сетевое оборудование должно обеспечивать круглосуточные наблюдения или сервисные работы на всех телескопах обсерватории. Для повышения надежности желательно минимизировать влияние человеческого фактора на настройки сетевых элементов, в частности, так чтобы подключение мультиплатформенных клиентов сети не требовало ручного вмешательство администратора (Zero Conf).
4. Требования к сервисному обеспечению и адресному пространству сети обсерватории определяется следующими факторами. Как правило все штатные сотрудники (440 чел.)[4], аспиранты, приезжающие студенты и наблюдатели нуждаются как во внутрисетевом, так и Интернет-доступе. Только за последние 3 года в проводной сети Нижней и Верхней научных площадок зарегистрировано 770 уникальных сетевых адресов (MAC).
5. Сеть должна иметь достаточную периферийную защиту со стороны Интернет и быть топологически максимально связной для внутреннего обмена данными между клиентскими компьютерами, серверами и научным оборудованием.
6. Обязательна автоматизация мониторинга основного оборудования и линий связи.

Из перечисленного видим, что ничего сверх обычного от сети не требуется, в том числе, какая-либо разработка дорогостоящих уникальных технологий. Однако с помощью устаревающих средств IPv4 реализация п.п. 2 – 5 нетривиальна.

Несмотря на то, что разработка нового протокола IP ведется давно и он уже тщательно проработан и отлажен, существуют объективные причины задержки внедрения IPv6. Перечислим основные из них, актуальные для САО РАН:

1. Некоторое количество дешевого сетевого оборудования еще не предусматривает в полной мере или не отлажено для работы в сетях IPv6, поскольку расчитано на сверхмалые домашние и офисные сети (SOHO), подключаемые к Интернет-провайдеру по IPv4 с существенным адресным ограничением.
2. Проблема нехватки глобальных IP-адресов, которая имелась из-за использования IPv4 с 32-битным адресным полем, была частично снята с помощью сетевой адресной трансляции – NAT для ассиметричного доступа в Интернет с помощью микророутеров, в том числе беспроводных.
3. Наличие в пользовании сторонних сетевых приложений, основой для которых является исключительно IPv4. Их перечень постепенно сокращается.
4. Крупнейшие российские сетевые операторы, такие как “Ростелеком” не спешат с внедрением сервиса IPv6, экономя ограниченный адресный ресурс. Что весьма парадоксально,

поскольку по сведениям Google в 2018 году[5] степень адаптации ресурсов Интернет к IPv6 достигла 20% (Рис.1).

Проблемы развития локальной сети IPv4.

К сожалению, использование IPv4 ведет к трудностям при создании локальной сети научной организации, более крупной, чем сеть SOHO с Интернет-подключением. При слабой централизации или без жесткого администрирования развитие сети становится хаотичным как по структуре, так и по функционированию. Возникают или слабосвязанные сегменты сети, объединяемые PC-роутерами – серверами лабораторий или крупные конгломераты IPv4 сети с существенным широковещательным трафиком и слабоуправляемым назначением интернет-адресов. Очевиден конфликт требования мобильности компьютеров, персональных сетевых устройств, с необходимостью жесткой адресной привязки к сетевой структуре и административным управлением адресами. При этом были случаи неправильной и деструктивной самостоятельной настройки сетевых интерфейсов, приводящие к сбоям и даже потерям наблюдательного времени. Попытки же внедрить динамическое назначение IPv4 адресов с помощью сервиса DHCP в лучшем случае охватывали беспроводный WiFi сегмент, увеличение масштаба которого может привести к еще большей нестабильности.

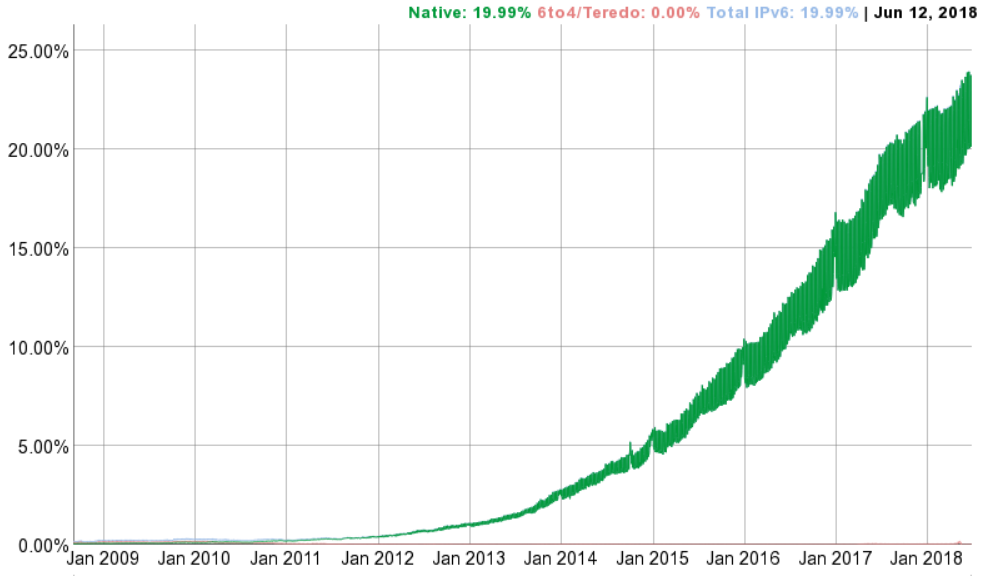


Рисунок 1 "Процентная доля поисковых запросов пользователей IPv6[5]."

Преимущества IPv6 для локальной сети организации.

Обычно считают, и это отчасти правильно, что полезность внедрения IPv6 для Интернет состоит в решении известной проблемы нехватки адресного пространства, которое расширяется благодаря выделению 128 бит на адрес и практически неисчерпаемого даже в далекой перспективе. Для случая локальной сети организации это совершенно не главное, хотя и эта проблема проявляется при неудачном разбиении IPv4 сети на сегменты. Однако следует обратить внимание пользователей на другие полезные свойства IPv6. Они перечислены ниже:

1. Механизм автоматического назначения адресов сетевых устройств – SLAAC с помощью ND RA – Neigbour Discovery and Router Advertisment.
2. Механизм исключения адресных конфликтов на уровне функционирования операционной системы (ядра), который, как правило недоступен для отключения на уровне пользователя и исключает непреднамеренные ошибки.
3. Исключение сборки-разборки сетевых пакетов в промежуточных маршрутизаторах из-за возможной фрагментации, что резко сокращает требования к ресурсам активного

оборудования при масштабировании размеров и производительности сети. Сборка-разборка пакетов IPv6 производится только на оконечных сетевых устройствах. При этом максимальный размер одиночного пакета (MTU) как правило фиксирован. Это не только повышает производительность, но и устойчивость соединений к возможному вмешательству или искажению информации на самом низком уровне протоколов, облегчая защиту соединений. Примером может послужить тот факт, что ежемесячно на центральный маршрутизатор САО РАН из Интернет производится более сотни атак фрагментирования, приводящие к системным собщениям о сбоях в резервировании буферов ввода-вывода. Отсутствие необходимости промежуточной сборки пакетов существенно упрощает реализацию мобильного подключения и безразрывное переключение клиентских устройств между беспроводными точками доступа.

4. Исключение необходимости ARP (Address Resolution Protocol) – основного протокола для установки соответствия интернет-адреса физическому адресу сетевого интерфейса. Для ARP обязательна рассылка широковещательных (broadcast) пакетов внутри сетевого сегмента, что может привести к образованию скачкообразных нагрузок в передаче при увеличении размеров сети и количества активных сетевых устройств – компьютеров и коммутаторов. Генерация таких “штормов” особенно опасна для функционирования сети в случаях непреднамеренного “закольцовывания” сегментов сети при ошибочных настройках сетевых устройств или каналов, например WiFi.

5. Стек протоколов IPv6 встроен и хорошо отлажен практически во всех современных операционных системах для серверов, персональных компютеров и мобильных устройств. Исключение могут составлять старые сетевые адаптеры некоторых принтеров, сканеров, ИБП и тому подобных периферийных устройств.

6. Использование IPv6 не препятствует IPv4[6] , не конфликтует с ним, и при грамотном подходе может внедряться постепенно без остановки функционирования сети.

Адресация в локальной сети.

В сетях IPv4 соответствие 32-битного IP адреса 48-битному физическому адресу сетевого адаптера – MAC не могло быть полностью однозначным. Устройство с нужным IP находилось посредством широковещательного ARP-запроса. Для IPv6 назначение адресов иное и в большей степени может быть автоматизировано, поскольку его 128-битный адрес может полностью содержать и необходимые 48-бит MAC. Стандарт адресации в сети IPv6 предусматривают несколько способов формирования как префиксной, так и суффиксной частей 128-битного адресного пространства. Наиболее привлекательным, учитывая преемственность от сетей IPv4, нам показался способ составления адреса, основанный на стандарте инкапсулирования пакетов IPv6 в пакеты IPv4 . Это не означает, что в локальной сети мы будем прибегать к такой инкапсуляции, но позволит нам уже на начальном этапе внедрения получить корректные маршрутизируемые адреса IPv6 без специального обращения к провайдеру Интернет. При этом адрес сетевого элемента составляется из следующих частей. В начале адреса: 2002 (шестнадцатиричное) – признак переходного способа формирования суффикса из глобального адреса IPv4 – "IPv6to4", затем глобальный адрес IPv4 выданный провайдером, преобразованный в 8 шестнадцатеричных символов. Далее 4 цифры определяют один из возможных 164 сегментов локальной сети. Итого под фиксированную часть (префикс) будет задействовано половина из 128 битного адреса. Остальные 64 бита формируются по стандарту eui-64 из 48-битного уникального MAC-адреса интерфеса конкретного сетевого устройства. Прием префикса от маршрутизатора и дополнение до полного адреса ОС компьютера производит автоматически с помощью сервиса ND RA. Примером является адрес сервера cats: 2002:3e4c:2601:0000:12bf:48ff:febb:e390. Тут значение 3e4c:2601 сформировано из адреса 62.76.38.1 и подсеть 0000. Последовательность из одних нулей в записи обычно сокращают до "::".

IPv6 и адресная сегментация локальной сети.

При внедрении сетей IPv6 отсутствует острая необходимость сегментации, аналогичной разбиению сетей прошлого поколения, благодаря отказу от рассылки широковещательных ARP-запросов. Тем не менее существующую структуру сети очевидно не стоит менять революционным путем. Хотя сегментация локальной сети может доставить дополнительное неудобство, она может быть оправдана необходимостью повышения безопасности в выделенных подсетях, обеспечить независимое администрирование при территориальном разнесении или выделении зон ответственности. Префикс сетей IPv6 совместно с механизмом SLAAC позволяет выделить 16 байт для назначения номера подсети внутри одной сети построенной всего из одного выделенного IPv4 – глобального адреса провайдера. Напомним, что это эквивалентно количеству 65536 подсетей. Для каждого сегмента администратором должен быть определен интерфейс физической или виртуальной сети для коммутатора 3-го уровня (маршрутизатора) и настроен сервис ND RA, тем самым мы обеспечим автоматическое переназначение адреса конкретного компьютера при переносе его из одного сегмента в другой. Связность сегментов мы обеспечиваем маршрутизацией по OSPFv3[11,12] с помощью оборудования Cisco Systems, Inc.

Таблица 1. Сегментация SAO-NET

подсети	**Назначение**
2002:3e4c:2601:0:/64	Сеть Нижней и Верхней научной площадки
2002:3e4c:2601:1:/64	WiFi
2002:3e4c:2601:2:/64	Сеть механических мастерских
2002:3e4c:2601:3:/64	Campus-NET
...	
2002:55ac:bec2:0:/64	Сеть РАТАН-600
2002:55ac:bec2:8:/64	Оптический линк РАТАН-600 - ННП

В таблице 1 перечислим возможные номера сегментов локальной сети SAO-NET.

Особенности настройки IPv6 для регистрации в DNS.

Клиенту локальной сети IPv6 обычно нет необходимости специально настраивать сетевой доступ, поскольку обычно достаточно настроек по-умолчанию. Если же компьютеру необходимо сетевое имя, то перед регистрацией в службе DNS администратору необходимо проверить настройку системы этого компьютера. Для постоянной регистрации имен серверов следует отключить приватный (рандомизированный) способ присвоения суффиксной части адреса , оставив фиксированный адрес в формате eui-64. Поскольку пользователю, возможно, непросто сориентроваться в описаниях различных операционных систем, сведем нужные фрагменты в короткую инструкцию в виде таблицы 2.

Таблица 2. Запрет замены MAC на рандомизированный адрес.

Операционная система	
MS Windows	Выполнить однократно:
	netsh interface ipv6 set global randomizeidentifiers = disabled store = active
	netsh interface ipv6 set global randomizeidentifiers = disabled store = persistent
	netsh interface ipv6 set privacy state = disabled store = active
	netsh interface ipv6 set privacy state = disabled store = persistent
OSX	Выполнить:
	sudo sysctl − w net. inet6. ip6. use_tempaddr = 0
	В /etc/sysctl.conf

Операционная система	
	вставить net. inet6. ip6. use_tempaddr = 0
Linux	В /etc/sysconfig/network-scripts/ifcfg-“интерфейс”
	вставить IPV6_PRIVACY = no

Настройка приоритета версии IP

Обычно в настройках операционной системы сервера используется двойной стек адресации: IPv4 совместно с IPv6. Как правило, использование более современного IPv6 по-умолчанию установлено с большим приоритетом. Но это можно изменить, для чего необходимо воспользоваться соответствующим руководством[9] . Например в Linux-е для максимального уменьшения приоритета IPv6 необходимо отредактировать файл /etc/gai.conf, записав строку: precedence : : ffff : 0 : 0 / 96 100

Протестированные нами основные сервисы, необходимые для функционирования обсерватории, перечислены в таблице 3.

Таблица 3. Сервисы в SAO-NET.

Сервис	**Подержка IPv6**	**ОС Сервера**	**ОС Клиента**
SSH	Да	Linux, MS Windows	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
FTP	Да	Linux, MS Windows	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
SAMBA	Да	Linux, MS Windows	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
SMTP	Да	Linux, MS Windows	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
POP[2,3]	Да	Linux, MS Windows	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
IMAP[S]	Да	Linux, MS Windows	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
NFS	Да	Linux, MS Windows	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
NNTP	Да	Linux	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
HTTP[S]	Да	Linux	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
NTP	Да	Linux	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
X11	Да	Linux	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
RDP	Да	Linux, MS Windows	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
NTP	Да	Linux	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
DNS, DNS64	Да	Linux	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
Proxy	Да		
(Squid)	*IPv*6 ↔ *IPv*4	Linux	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
NAT64	Да	IOS Cisco, Linux	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
OSPF	Да	IOS Cisco, Linux	Linux
BGP	Да	IOS Cisco	-
ND RA	Да	IOS Cisco	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS
DHCP+DNS	Да	IOS Cisco	Linux, MS Windows, MAC OSX, iOS

Автоматизация настройки рабочих мест для выхода в Интернет.

Поскольку Интернет-доступ обсерватории обеспечивает провайдер “Ростелеком” и только по протоколам IPv4, то пользователю необходимо настроить свой браузер и системное окружение на использование DNS и proxy-сервера. Автоматическую настройку реализуем с помощью сервиса DHCPv6. Запуск и настройку DHCPv6 делаем на коммутаторах[12] каждого сегмента сети совместно с ND RA, при этом протокол DHCPv6 будем использовать только для

выдачи информации об адресах службы DNS и proxy. Таким образом, главное отличие от использования DHCPv4 в том, что и при отказе сервиса DHCP клиентский компьютер гарантированно получит уникальный и корректный адрес, но настройку вспомогательных сервисов необходимо будет произвести вручную, что не совсем удобно, но не так критично, как при отказе DHCP в сети IPv4. Стоит также учесть, что обычно адреса DNS и proxy статичны и доступны из всех сегментов локальной сети, то есть не обязательно подлежат перепрописыванию при переносе компьютера. Иными словами внедрение IPv6 позволяет разделить механизмы сервисов основной адресации на базе SLAAC и второстепенных, наследуемых от IPv4.

Задача proxy-сервера в первую очередь, как и раньше, состоит в том, чтобы позволить клиенту с локальными (немаршрутизируемыми вовне) адресами получить доступ к контенту Интернет IPv4, в том числе кэшируемому на дисках сервера для ускорения. Для этого на Linux-сервере с двойным стеком IPv4/IPv6 соответствующим стандартным образом настраиваем приложение Squid[2] . Он должен обрабатывать оба типа входящих запросов независимо от версии IP, а обращаться к внешним серверам только по адресам IPv4. Для этого в его файле конфигурации /etc/squid/squid.conf надо добавить запись dns_v4_first on. Прочие способы IPv4 он-лайн доступа на внешние ресурсы – терминальный SSH и тому подобные, можно так же организовать через промежуточный сервер с двойным стеком адресации. При этом на сервер можно установить программный пакет TAYGA[13,14], который организует адресную трансляцию выделенного пула клиентов IPv6 в соответствующее количество внешних IPv4 адресов (NAT64)[7,8]. Для данных клиентов необходимо также настроить DNS-сервер с функцией DNS64, который, получая от них запросы, выдаст адреса внешних ресурсов с преобразованием IP-заголовка. В противном случае ОС клиента выдаст сообщение о недоступности ресурса. В случае же небольшого числа клиентов их можно просто зарегистрировать на сервере для терминального доступа к внешним ресурсам.

Мониторинг и управление.

В настоящее время сетевое оборудование ведущих производителей адаптировано для управления и мониторинга в сетях IPv6. Некоторую проблему могут представлять только устаревшие коммутаторы или SOHO WiFi – маршрутизаторы. Первые просто “прозрачны” для IPv6, а последние также доступны для серверов с двойным стеком IP. В любом случае неадаптированные устройства постепенно выводятся из эксплуатации. В качестве программного средства мониторинга в обсерватории используются пакеты mrtg[15] и nagios[16] . Оба могут работать с IPv6 – сетевыми агентами. Только в настройках nagios в качестве “тестера” доступности и работоспособности сетевого агента следует заменить программу посылки ICMP пакетов – ping на ping6, аналогичную для IPv6. Фрагмент вебстранички с сервера мониторинга сети САО отображен на Рис.2.

В локальных сетях, типа кампусных, потенциально могут возникать проблемы внутренних атак. В таких случаях важно вести мониторинг со сбором статистики подключаемых узлов и их идентификацией. Один из способов реализации этих средств, позволяющий накопить в базе данных и визуализировать результаты, описан в работе[17] .

Собственно управление сетью существенно упрощается при переходе на IPv6. В основном оно складывается из трех частей: назначение IP-адреса сетевому устройству, настройка маршрутизации и фильтрации пакетов в сегментах сети, и регистрация, то есть назначение имен устройств в DNS. Первая часть полностью автоматическая, вторая выполняется не чаще, чем меняется архитектура сети или коммутатор. Последняя – только по запросу, при установке нового сервера и, в принципе, тоже может быть автоматизирована при внедрении саморегистрации на административном web-сервере.

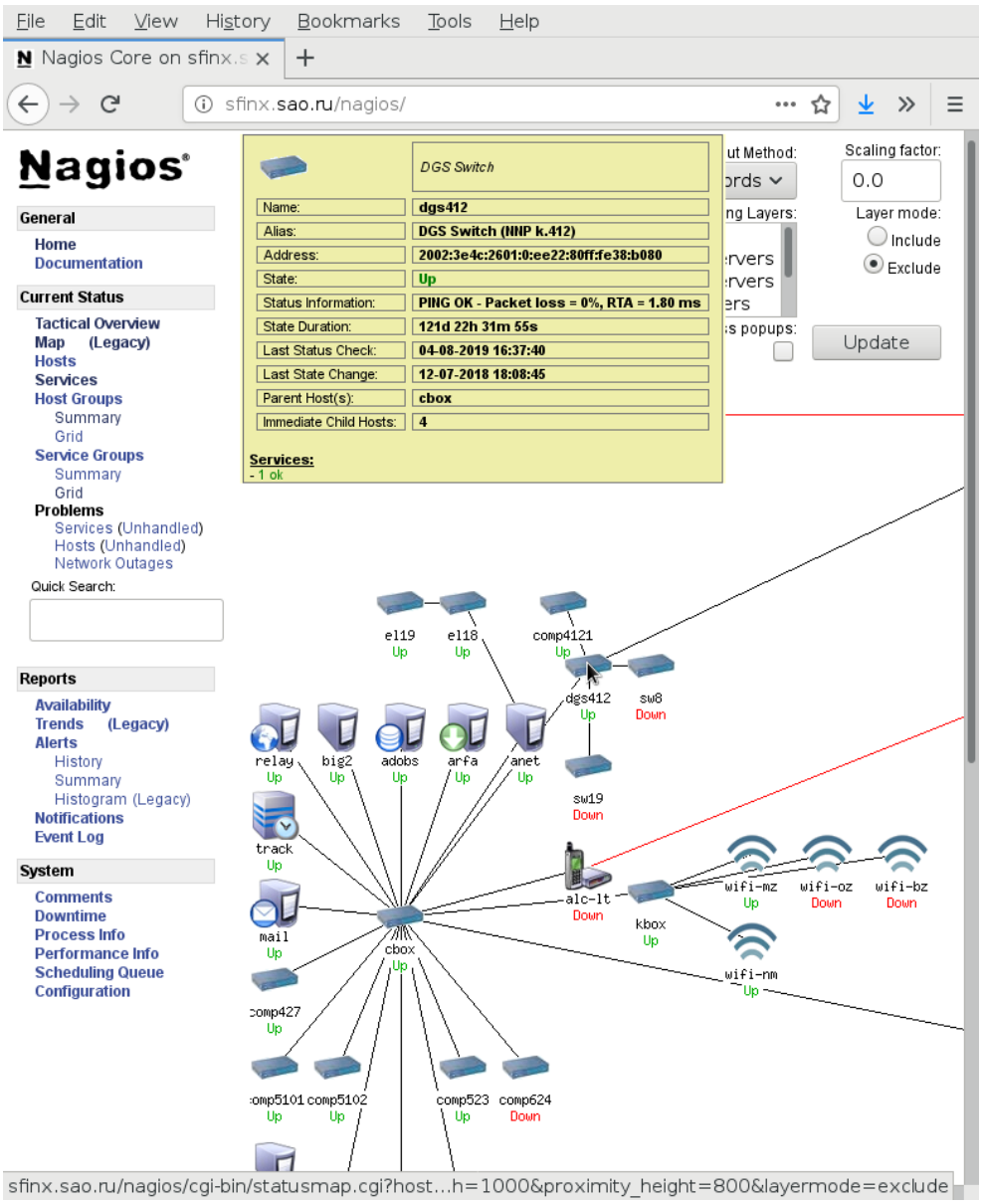


Рисунок 2 "Вебстраничка системы мониторинга сети САО РАН. Курсор указывает на коммутатор с IPv6."

Выводы.

Исходя из полученного опыта по настройке, тестированию и сопровождению сетевого оборудования обсерватории следует вывод о целесообразности внедрения IPv6 в практику эксплуатации наблюдательных инструментов и рабочих мест астрономов. Использование современных сетевых решений, в том числе основанных на IPv6, снижает затраты на обслуживание и повышает оперативность подключения новых пользовательских компьютеров. Сетевой компьютер или прибор может без специального административного сопровождения переподключен между портами коммутаторов различных помещений с гарантированным сетевым доступом в режиме 24x7. Результаты тестирования по использованию технологических решений, основанных на IPv6, показали как таким образом реализовать локально-масштабируемую и практически самонастраеваемую сетевую инфраструктуру обсерватории. В перспективе, включение нашей сети в глобальный Интернет IPv6 уже не потребует революционного изменения в методике сопровождения удаленных наблюдений.

Автор благодарит Витковского В.В. и Иванова А.А. за предоставление возможности провести исследования с помощью штатного и нового сетевого оборудования обсерватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черненков В.Н., Шергин В.С., Компьютерная сеть САО. Архитектура, базовые средства, приложения. XXV Рдиоастрономическая конференция. Тезисы доклада 20-24 сентября, Пущино, 1993, 236–237

2. Черненков В.Н., Витковский В.В., Желенкова О.П., Павлов С.В., Управление доступом к контентам виртуальной среды образования в Интернет, Математика.Компьютер.Образование., Сб. научных трудов, Вып. 8, ч.1, 2001, 160–163

3. S. Deering, R. Hinden, “Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification”,https://tools.ietf.org/html/rfc2460, December 1998

4. Власюк В.В., Отчет директора на Ученом совете за 2017г., http://www.sao.ru/Doc-k8/Science/reportUS/2017.pdf, Декабрь 2017

5. Google, “IPv6” Google Statistics, http://www.google.com/ipv6/statistics.html, Retrieved 27 April 2015

6. E. Nordmark, R. Gilligan, Basic Transition Mechanisms for IPv6 Hosts and Routers, https://tools.ietf.org/html/rfc4213, October 2005

7. B. Carpenter, K. Moore, Connection of IPv6 Domains via IPv4 Clouds, https://www.ietf.org/rfc/rfc3056.txt, February 2001

8. T. Narten, R. Draves, S. Krishnan, Privacy Extensions for Stateless Address Autoconfiguration in IPv6, https://tools.ietf.org/html/rfc4941, September 2007

9. Microsoft Windows support, Resolving Internet connectivity issues after World IPv6 Launch, https://support.microsoft.com/en-us/help/2533454/resolving-internet-connectivity-issues-after-world-ipv6-launch-june-6 , June 6, 2012

10. J. Abley, Resource Records for EUI-48 and EUI-64 Addresses in the DNS, https://tools.ietf.org/html/rfc7043, October 2013

11. R. Coltun, D. Ferguson, J. Moy, A. Lindem, OSPF for IPv6, https://tools.ietf.org/html/rfc5340, July 2008

12. Cisco Systems, “Catalyst 3750 Software Configuration Guide, Release 12.2(55)SE”, https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/catalyst3750/software/release/12-2_55_se/configuration/guide/scg3750.html, August 9, 2016

13. N. Lutchansky, “TAYGA, a stateless NAT64 implementation for Linux”, http://www.litech.org/tayga/, Jun 10, 2011

14. E. Opredelennov, NAT64 setup using tayga, https://packetpushers.net/nat64-setup-using-tayga, August 6, 2016

15. T. Oetiker, MRTG - The Multi Router Traffic Grapher, https://oss.oetiker.ch/mrtg/, March 5, 2017

16. E. Galstad, Nagios Core 4.x, https://www.nagios.org/, June 25, 2018

17. Matej Gregr, Petr Matousek, Tomas Podermanski, Miroslav Sveda, Practical IPv6 Monitoring at Campus Network, https://services.geant.net/sites/cbp/Knowledge_Base/Network_Monitoring/Documents/gn3-na3-t4-cbpd132.pdf, May 2011

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-223-228

Емельянов Эдуард Владимирович, Фатхуллин Тимур Амирович

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

MMPP — MULTI-MODE PHOTOMETER-POLARIMETER. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА И СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИБОРОМ.

Аннотация. *Описано устройство многорежимного фотометра-поляриметра, разработанного для телескопа Zeiss-1000 САО РАН. Приведены основные методы, реализуемые на данном фотометре. Рассмотрено расположение элементов прибора, состав и функционал его системы управления.*

Ключевые слова: *фотометрия, поляриметрия, астрофизика.*

Annotation.*The structure of the multi-mode photometer-polarimeter developed for the Zeiss-1000 telescope of SAO RAS is described. The main methods implemented on this photometer are considered. The location of the elements of the device, the composition and functionality of its control system is described.*

Keywords: *photometry, polarimetry, astrophysics.*

В САО РАН более полутора десятилетий на 1-метровом оптическом телескопе Zeiss-1000 фотометрические методы были представлены ПЗС-фотометром, оснащенным стеклянными фильтрами системы UBVRI Джонсона-Казинса 1, а также в интегральном свете в диапазоне чувствительности ПЗС 360-1000 нм. По сути, данный фотометр представлял собой комбинацию из ПЗС EEV 2k×2k пикселей и двух турелей с оптическими светофильтрами. Эффективность фотометра в фотометрических полосах не превышает 50% (в полосе U она ниже 4%). Поляриметрические методы никак не были реализованы на телескопе. Для расширения доступных методик и увеличения эффективности фотометрии в 2017 г. было принято решение разработать новый прибор, сочетающий в себе фотометр, а также поляриметр с возможностью измерения как линейной, так и эллиптической поляризации с точностью не хуже 0.1%.

Многорежимный фотометр-поляриметр предназначен для проведения фотометрических и поляриметрических исследований. Прибор оснащен двумя турелями USB-HSFW (Edmund Optics) с пятью позициями для 50-мм фильтров, анализатором линейной поляризации и четвертьволновой пластиной в качестве анализатора эллиптической поляризации. Основным светоприемником фотометра является ПЗС Eagle V (2048×2048 пикселей), позволяющий проводить научные исследования в диапазонах от 300 до 1050 нм с максимумом чувствительности около 600 нм. Данный ПЗС оснащен водяным охлаждением. Также прибор рассчитан на использование с быстрым КМОП-светоприемником Andor NEO 5.5 (2560×2160 пикселей) в режиме «быстрой фотометрии» и «lucky imaging».

Управление прибором осуществляется при помощи компьютера на основе операционной системы Gentoo Linux. Дистанционное управление реализовано как посредством утилит командной строки (позволяющих автоматизировать рутинные наблюдения при помощи bash-скриптов), так и посредством графического интерфейса.

В фотометрическом режиме в течение ночи без переоснащения прибора возможна работа в восьми фотометрических полосах. Изменение рабочего набора фильтров выполняется посредством замены колес в турелях (пять наборов колес описаны в конфигурации интерфейса управления прибором, нестандартные наборы потребуют изменения конфигурации).

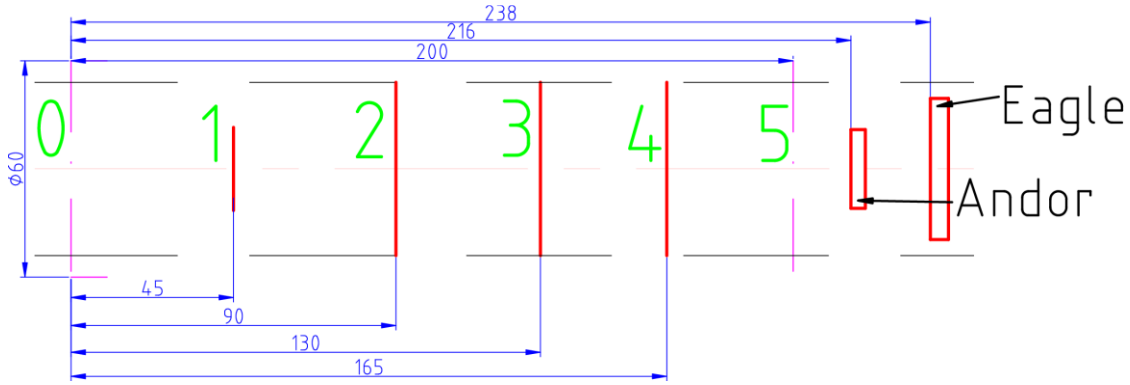


Рисунок 1: Оптическая схема прибора. Обозначения: 0 – входное окно (плоскость фланца телескопа), 1 – четвертьволновая пластина, 2 – анализатор поляризации, 3 и 4 – интерференционные фильтры, 5 – выходное окно. Eagle, Andor — плоскости расположения соответствующих светоприемников.

На рис.(1) приведена схема расположения узлов ММРР. Непосредственно на входном фланце закреплен транслятор поворотной платформы фазовой пластины диаметром 25 мм. Далее располагается транслятор поворотной платформы анализатора поляризации диаметром 50 мм. Последними в корпусе установлены турели фотометрических фильтров (диаметр фильров 50 мм). К задней стенке прибора крепится фланец светоприемника: ПЗС или КМОП.

Исходные коды аппаратной части системы управления, утилит командной строки, библиотеки для построения интерфейса системы управления, принципиальные схемы электронных компонентов и pdf-файлы с чертежами узлов прибора размещены в отдельном репозитории github[2].

Теоретическое невиньетированное поле прибора составляет 11.4′ в режиме фотометрии, 10.9′ в режиме линейной поляризации, 2.6′ в режиме циркулярной поляризации. Диагональ используемых светоприемников: ПЗС — 10.3′, КМОП — 5.6′.

2 https://github.com/eddyem/mmpp

Рисунок 2: ММРР на фланце телескопа Zeiss-1000.

На рис.(2) приведено изображение фотометра, смонтированного на фланце фокуса Кассегрена телескопа Zeiss-1000.

Элементы механики ММРР

Корпус прибора прямоугольной формы выполняет также функцию каркаса для внутренних элементов. На поверхности фланца размещается механизм циркулярной поляризации с контроллером, механизм линейной поляризации с контроллером и блоком питания размещаются на передней и задней стенках прибора. Турели с фильтрами установлены на крышке прибора, к которой с внешней стороны присоединяется фланец светоприемника.

Поворотные платформы фазовой пластины и анализатора поляризации установлены на цилиндрических направляющих, позволяющих при помощи соединения винт-гайка вводить и выводить их из пучка посредством шаговых двигателей. Шаг винтового соединения составляет 1 мм, т.е. поворот шаговых двигателей на один шаг приводит к перемещению трансляторов на 5 мкм. Перемещение трансляторов ограничено датчиками Холла A1101. Точность установки нуль-пункта трансляторов составляет ±0.13 мм. В положении «0» оба транслятора полностью выведены из пучка. Полный ход трансляторов задается юстировкой датчиков Холла; для фазовой пластины он составляет около 67.5 мм, для транслятора анализатора поляризации — около 145 мм.

Положение «в пучке» определяется юстировкой прибора, которую необходимо производить каждый раз после вмешательства в положение трансляторов или концевых датчиков. В среднем для транслятора фазовой пластины оно составляет 11.5 тыс. шагов, а для транслятора анализатора поляризации — 16.5 тыс. шагов.

Четвертьволновая фазовая пластинка приводится во вращение при помощи поворотной платформы 8MPR16-1 фирмы Standa, в которой аналоговый датчик Холла (служащий для определения нуль-пункта) заменен на A1101 (с встроенным компаратором и триггером Шмидта). Для вращения анализатора поляризации используется поворотная платформа 8MR190-2-4233 фирмы Standa. В ней в качестве нуль-пункта используется концевой выключатель. Конструктивные изменения данной платформы заключаются в удалении разъема типа DS9 и подключения проводки напрямую посредством пайки.

Точность установки нуль-пунктов обеих поворотных платформ составляет ±5′. Дискрет поворотной платформы фазовой пластины составляет 0.75′ (80 шагов на 1°), дискрет анализатора поляризации — 0.6′ (100 шагов на 1°).

Монтаж фотометра на фланце телескопа Цейсс–1000 выполняется в соответствии с положением меток на фланцах телескопа и прибора. Аналогично по расположению меток устанавливаются светоприемники.

Для возможности быстрой смены колес с фильтрами в фотометре сделаны люки, позволяющие открыть крышки турелей, ослабить фиксирующие винты и произвести замену колес. Так как доступу к фиксирующему винту нижней турели препятствует транслятор поляроида, над боковой крышкой размещены кнопки, позволяющие перемещать оба транслятора вручную на месте. Эти же кнопки могут использоваться для грубого перемещения трансляторов на стадии начальной юстировки.

Элементы системы управления прибором

Турели

Турели Edmund Optics поддерживают до пяти разных колес с фильтрами. Маркировка колес выполняется при помощи постоянного магнита, запрессовываемого в соответствующее отверстие на колесе. Так как турели представляют собой самостоятельные устройства с управлением по USB, система управления ММРР имеет модульную структуру. В приборе размещен USB-концентратор, к которому подключены обе турели с фильтрами, а также

преобразователь интерфейсов USB↔TTL для работы с модулями управления шаговыми двигателями.

Протокол управления турелями HSFW Edmund Optics не был документирован фирмой-изготовителем, поэтому был восстановлен методом обратной разработки. Устройство работает через HID-интерфейс и не нуждается для работы в правах суперпользователя. Для управления устройством разработана утилита HSFW_management[3], полностью реализующая возможности турелей: поиск среди устройств по идентификатору, названию колеса или названию фильтра; перемещение заданного колеса в требуемую позицию; реинициализация с перемещением в стартовую позицию; сохранение сведений о фильтрах в различных колесах в EEPROM устройства.

При проведении технических работ, а также для удобства работы в пакетных режимах используется данная утилита. Для удобства же создания

Шаговые двигатели

Каждый линейный транслятор в совокупности с соответствующей поворотной платформой и управляющим контроллером оформлен как отдельное устройство. Все управляющие контроллеры размещаются на одной сигнальной шине UART (протокол: 8N1). Сигналы Tx контроллеров подключаются по схеме «открытый сток» с использованием внешней или слабой внутренней подтяжки. Скорость интерфейса задается в настройках контроллера, по умолчанию это 9600 бод.

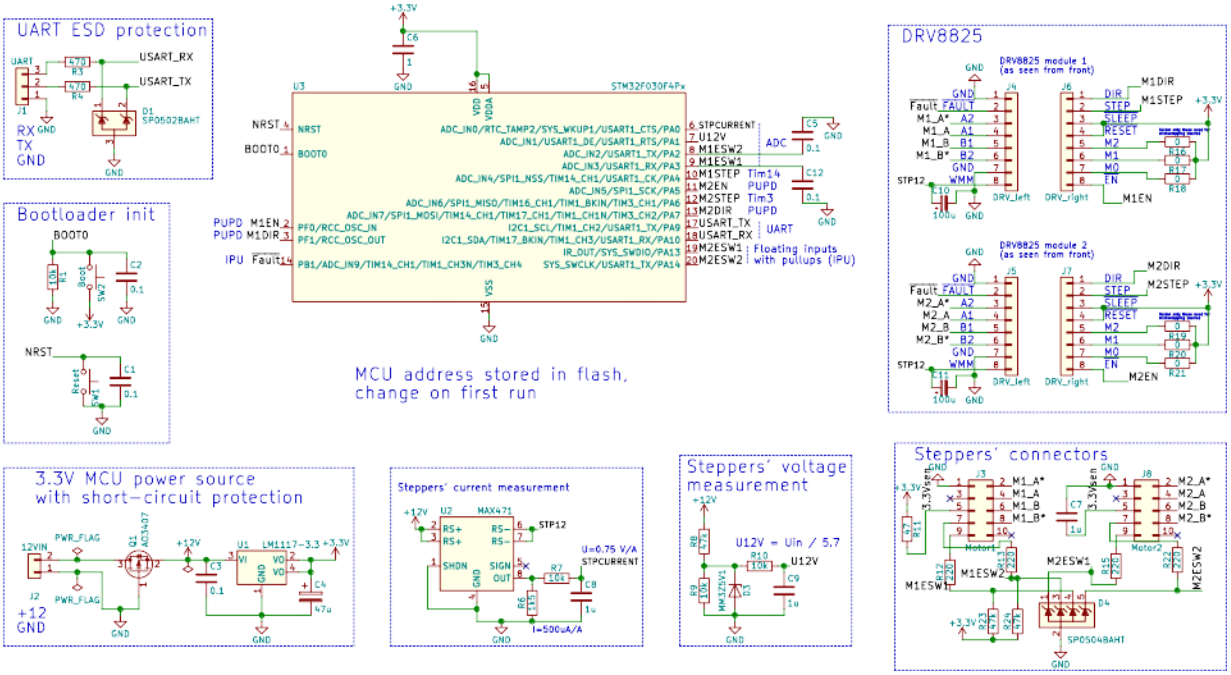


Рисунок 3: Принципиальная схема контроллеров шаговых двигателей.

Система управления построена на основе микроконтроллера STM32F030 (см. рис.(3)). Запись микропрограммы выполняется посредством встроенного в микроконтроллер загрузчика с последовательным интерфейсом (для его активации на плате размещены кнопки «boot» и «reset»). При помощи датчика тока MAX471 возможно измерение величины тока, потребляемого двигателями в процессе работы (данный функционал может также использоваться для диагностики проблем с питанием двигателей). Микроконтроллер формирует сигналы STEP/DIR, которые преобразуются в силовые сигналы для шаговых двигателей при помощи модулей на основе драйверов DRV8825. Драйверы работают в режиме дробления шага на 16, однако,

3 https://github.com/eddyem/eddys_snippets/tree/master/HSFW_management

система управления не позволит переместить шаговый двигатель на дробное количество шагов, т.к. после окончания движения двигатель обесточивается с целью снижения тепловыделения во внутреннем объеме прибора.

Система обеспечивает плавный разгон и торможение двигателей (кроме ситуаций наезда на концевик). Интерфейсы подключения концевых выключателей различаются: для двигателя линейного транслятора концевые датчики Холла подключаются к аналоговым входам МК, что позволяет параллельно с ними установить дополнительные кнопки управления с внешней слабой подтяжкой (резисторы сопротивлением 47 кОм) к земле. Данные кнопки выведены на лицевую панель прибора и позволяют управлять перемещением трансляторов без компьютера (для проверки работоспособности системы и перемещения транслятора анализатора поляризации при замене колеса нижней турели светофильтров).

Номер контроллера (по умолчанию — 0) и базовые настройки хранятся во внутренней флеш-памяти МК. В случае замены контроллера до установки его в прибор необходимо провести базовые настройки в соответствии с документацией.

Сразу после включения питания контроллеры находятся в неинициализированном состоянии. Для их инициализации в ручном режиме необходимо сместить все позиционные устройства в положительном направлении на небольшую величину (для гарантированного съезда с нулевого концевика), а затем двигать их в отрицательном направлении на количество шагов, превышающее рабочий диапазон — для установки на нулевые концевики. Далее до следующего отключения питания эту процедуру проводить не нужно.

Для удобства управления устройствами MMPP разработана утилита MMPP_control[4]. Она может использоваться совместно с HSFW_management при работе в пакетном режиме.

Пробная эксплуатация графического интерфейса пользователя, работающего как самостоятельное приложение и выполняющее взаимодействие с узлами прибора при помощи вызова внешних утилит, показала, что для обеспечения надежности и удобства (прежде всего — предотвращения коллизий, а также для кроссплатформенности) необходимо разработать новую систему управления на основе клиент-серверной архитектуры, где базовая часть (сервер) не зависела бы от перезапусков утилиты графического интерфейса клиентом. С целью упростить взаимодействие графических утилит с узлами MMPP была разработана библиотека MMPP_lib[5]. Данная библиотека помимо документации содержит примеры, реализующие весь основной функционал отдельных приложений MMPP_control и HSFW_management. Функционал библиотеки позволяет использовать ее при разработке интерфейсов на языках *C* и *C++*.

Пробная эксплуатация MMPP

С декабря 2018 года началась пробная эксплуатация прибора на телескопе Zeiss-1000. До начала эксплуатации необходимо было съюстировать узлы прибора и определить нуль-пункты. Была разработана методика начальной юстировки.

Для установки нуль-пунктов линейных трансляторов используются вспомогательные рамки с натянутыми на них нитяными крестами. При помощи засветки точечным или крестообразным лазерным источником визуально либо при помощи видеокамеры выполняется совмещение нитяных перекрестий с оптической осью прибора. Таким образом производится юстировка трансляторов и определение положения (в шагах) оптических узлов «в пучке».

Для определения положений нуль-пунктов анализатора поляризации и четвертьволновой пластины необходимо использовать дополнительное оборудование: осветитель, оснащенный поляризатором с известным направлением поляризации, а также формирователь круговой поляризации с известным направлением вращения (поляризатор и четвертьволновая пластина).

4 https://github.com/eddyem/mmpp/tree/master/MMPP_control

5 https://github.com/eddyem/mmpp/tree/master/MMPP_lib

Определение нуль-пункта анализатора поляризации производится при помощи вспомогательного поляроида (призма Глана), осветителя с объективом и светоприемника (при достаточной яркости осветителя в качестве светоприемника возможно использовать фотодиод или фоторезистор).

После определения нуль-пункта анализатора он выставляется в положение 90° по отношению к осветителю, и в пучок вводится фазовая пластина. Измеряя интенсивность прошедшего света в зависимости от угла вращения четвертьволновой пластины определяются положения плоскостей ее экстремальных скоростей. Определить, какая из плоскостей соответствует максимальной фазовой скорости, можно при помощи источника циркулярно поляризованного света с известным направлением вращения плоскости поляризации.

Использование интерференционных светофильтров имеет определенный недостаток при комбинировании их с ПЗС Eagle: из-за расширения рабочего диапазона светоприемника в полосах U и B возникает ИК-избыток 2. Избавиться от него удалось лишь с применением блокирующих фильтров (которые, к сожалению, в 2-3 раза снизили эффективность прибора в этих двух полосах).

Основным недостатком рабочих светоприемников является необходимость использования системы жидкостного охлаждения. Приобретенная система (ООО «Завод Кристалл») оказалась неработоспособной в условиях расширенного температурного диапазона, а ее внутренние недоработки привели к тому, что температуру жидкости невозможно охладить ниже 5-6°C относительно окружающей температуры. В условиях значительных перепадов температуры в течение наблюдательной ночи это приводит к нестабильности температуры кристалла ПЗС, что делает невозможным проведение высокоточных измерений. В целях вывода прибора в режим штатной эксплуатации разрабатывается специальная система жидкостного охлаждения с возможностью стабилизации температуры жидкости при широких диапазонах изменения температуры окружающей среды.

Опытная эксплуатация прибора позволила разработать и усовершенствовать методики проведения на нем абсолютных и относительных фотометрических измерений, измерений линейной и эллиптической поляризации. Для изучения спектральных характеристик прибора разрабатывается насадка с призмой прямого зрения (призма Амичи), которая позволит получать бесщелевые спектры низкого разрешения для спектральных измерений характеристик прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H.L. Johnson, W. W. Morgan. // The Astrophysical Journal, 1953, vol. 117 (3), pp. 313–352
2. U. Munari, S. Moretti. // Baltic Astronomy, 2012, vol. 21, pp. 22-31

III. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-229-234

Сафиуллин Равиль Нуруллович

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. *Определены проблемы и методологические подходы совершенствования систем управления энергетическими ресурсами при функционировании интеллектуальных зданий и сооружений. Результатом исследования является алгоритм создания серверного центра снижения затрат на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений, мониторинга энергопотребителей в реальном времени и прогнозирование расхода электроэнергии интеллектуальных зданий ИСЗ, который обеспечит накопление данных необходимых для оптимального планирования энергоресурсами, что позволит повысить обоснованность управленческих решений.*

Ключевые слова: *системы управления, автоматизация, технические комплексы, здания и сооружения, энергетические ресурсы*

Основой актуальных теоретических исследований по снижению издержек на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений, и как следствие, снижение негативного влияния на окружающую среду, в условиях интенсивно изменяющихся количественных и структурных параметров интеллектуальных технических средств при ограниченности градостроительных изменений исторически сложившихся целегенерирующих зон стали как Федеральные, так и региональные целевые программы модернизации энергетической системы в рамках программы «Умный Санкт-Петербург».

Автоматизация зданий в мире достигла высокого уровня, в России данное направление также набирает все большие обороты. На рынке систем «умных домов» существует огромное множество предложений, отличающихся друг от друга своим функционалом, средой передачи данных, сложностью структуры и т.д. Актуальность рассмотренной темы обусловлена тем, что применение систем автоматизации, позволяющих эффективно управлять инженерными системами зданий, востребовано как при реставрации существующих электроустановок, так и при проектировании новых. Эффективное управление такими системами здания, как освещение, отопление и кондиционирование позволяет снизить затраты на электроэнергию, а также способствует повышению комфорта при длительном пребывании человека в помещении.

Отсутствие единых требований и стандартов к применяемым средствам и создаваемым автоматических систем приводит к путанице в понятиях и к появлению оборудования, а вместе с этим и программного обеспечения сомнительного качества и функционала. На основании проведенного исследования [2] разработаны методологические основы и предложения по рациональному применению и совершенствованию интеллектуальных технических средств для эффективного управления энергетическими ресурсами. Данные рекомендации содержат разработанные методики, алгоритмы действий по выбору и рациональному функционированию

интеллектуальных технических средств, предусматривают конкретные мероприятия по их совершенствованию. Объективная необходимость научного обоснования и создания методологии инновационных технических и технологических решений обеспечения снижения затрат на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений в сложившихся условиях изменений его количественных, качественных и структурных параметров в крупных городах, поставлена заданиями Федеральных и региональных целевых программ. Основные задачи программ: повышение сбалансированности, эффективности управления энергетическими ресурсами при функционировании интеллектуальных зданий и сооружений, как части энергетической системы, обеспечивающей национальные интересы страны [3].

Выполнение программных мероприятий должно позволит на 30- 35 % снизить затраты на энергопотребление при функционировании энергетической системы. Реализация программ позволило провести институциональные преобразования, дальнейшее развитие производства высокотехнологичных компонентов и материалов, ввести государственные стандарты, отвечающие международным требованиям и обеспечить совершенствование научно-технического, кадрового потенциала.

В практике долгосрочных программ снижения затрат на энергопотребление зданий и сооружений, разработанных в последние годы в США, а также в европейских странах рассматривается не только развитие дорогостоящей инфраструктуры, но и мероприятия по формированию контроля ориентированного поведения участников процесса реализации программы. Опыт европейских городов показывает, что технические решения направленные на снижения затрат на энергопотребление зданий и сооружений, в ближайшем будущем существенно ограничат. Эти обстоятельства создают объективную необходимость интеграции ориентированных технологий уменьшения потребления энергоресурсов в управлении энергетическими сетями зданий на основе системноцелевого подхода к процессу. В основе данного подхода — положение о взаимосвязи работы интеллектуальных технических средств и образующейся при ее функционировании экономия энергоресурсов (в общей постановке) и, следовательно, возможности совместной оптимизации этих процессов. Модели, связывающие работу интеллектуальных технических средств (Ртр) и размера затрат на энергоресурсы **(**Rэ**),** составляют нормативно-целевой базис альтернативных реализаций сценариев их совершенствования. Критерии оптимизаций основываются на обобщающих технических и энергетических показателях данного процесса. В процессе управления энергетическими ресурсами интеллектуальных зданий и сооружений можно выделить три иерархических уровня процесса: на региональном мегауровне, на локальном макроуровне и на индивидуальном микроуровне (рис.1).

На каждом уровне процесс управления энергетическими ресурсами оптимизируется по следующим критериям:

Объем систем автоматизации, позволяющих эффективно управлять инженерными системами зданий в ***n***-й период не должен противоречить сохраняющейся тенденции увеличения потребления энергоресурсов в последующем ***n + 1*** периоде $P_{mp(n+1)} > P_{mp(n)}$ ($P_{mp(n)}$ не равно 0);

размера затрат на энергоресурсы **(**Rэ**),** Rэ < Rэд =*f*(c_p) не должен быть больше размера, которые могут создавать, не превышающие допустимых .

Для уровней установлены также общие ограничения: $A_{2i} \in A_{3i}$ *и* $L_{1k} \in L_{2k}$.

Оптимизационные модели имеют следующий вид:

Уровень 3:

$$P_3 = \sum f(A_{31}, A_{32},...A_{3n}; W_{31}, W_{32},...W_{3n}); \quad (1)$$
$$R_3 = \sum f(A_{31,} A_{32},...A_{3n};; r_{з1,} r_{32},...r_{3n}),$$

где A_{3i}, - количество интеллектуальных систем зданий(ИСЗ) $i_{-x;\ W3i}$ и r_{3i} - соответственно, объем автоматизации и размера снижения затрат одной единицы i-х ИСЗ за календарный период.

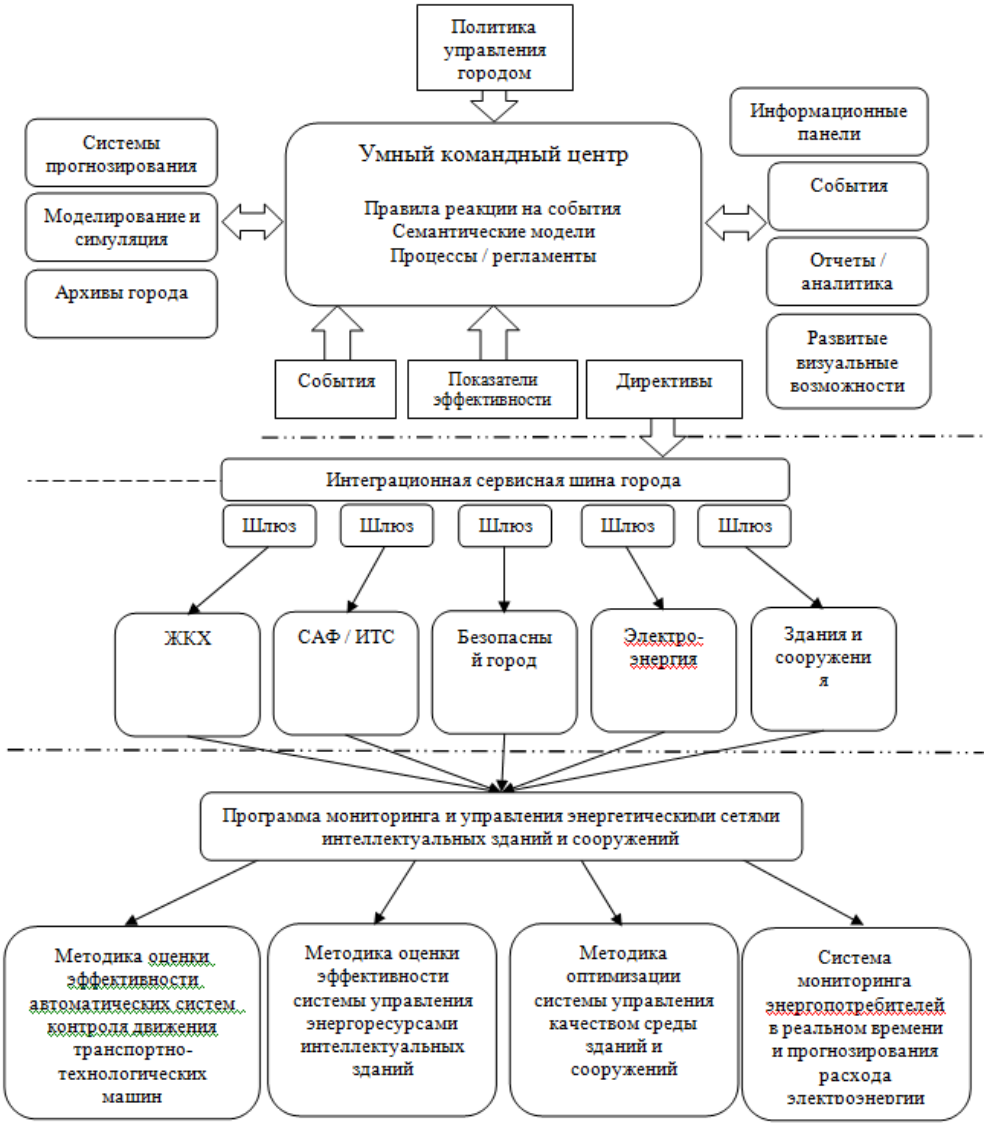


Рисунок 1. Иерархические уровни управления энергетическими ресурсами интеллектуальных зданий и сооружений.

Уровень 2:

$$P_2 = \sum f\,(q_{21}, q_{22},\ldots q_{2n};\ A_{21}, A_{22}, \ldots A_{2n});$$
$$R_2 = \sum f\,(g_{21}, g_{22},\ldots g_{2n};\ N_{21}, N_{22},\ldots N_{2n}), \qquad (2)$$

где q_{2i} и g_{2i} - соответственно, объем автоматизации и размера снижения затрат от функционировании одной единицы *i-х* ИСЗ $_k$, A_2i и N_{2i}, - число *i-х* ИСЗ ;

Уровень 1:

$$P_1 = \sum f\,(\omega_{11}, \omega_{12},\ldots \omega_{1n};\ tp_{11}, tp_{12},\ldots tp_{1n})',$$
$$R_1 = \sum f\,[T_2\, g_1, + g_1 t\,(tp_{11}, tp_{12},\ldots tp_{1n})], \qquad (3)$$

где g_{1L} и g_{1t} – размера снижения затрат от функционировании одной единицы *i-х* ИСЗ; ω_{11} и t_{p11} - часовая производительность и время работы *i-х* ИСЗ под управлением оператора.

На уровне 3 оптимизируется численность и состав ИСЗ. Структура ИСЗ должна соответствовать условиям ($C < C_Д$). Моделирование проводится как для отдельных зданий и сооружений, так и жилых районов, микрорайонов, с изменяющимися соотношением численности ИСЗ, соответствующих нормам.

На уровне 1 оптимизируется режим функционирования отдельного помещения здания. Подбор ИСЗ по этим критериям позволяет выполнять оптимальную работу с минимумом режимов, не обусловленных процессом энергосбережения.

В процессе исследования [4] систем управления энергетическими сетями интеллектуальных зданий и сооружений были разработаны методики (рис. 1) с целью повышения эффективности управления энергетическими ресурсами на каждом уровне по критериям снижения издержек на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений. Для оценки их эффективности функционирования интеллектуальных технических комплексов зданий и сооружений был применен многокритериальный подход. Для ее решения использовалась методика, предусматривающая ранжирование всех представленных критериев. В рассматриваемой постановке важность каждой оптимизационной задачи должна определяться по степени ее влияния на расход энергетических ресурсов и оцениваться объективным показателем – рангом влияния *j-го* частного направления оптимизации относительно наиболее приоритетного варианта (C_1) - R_{Sj/C_1}.

Тогда эффективность использования ресурса оптимизации (не хуже, чем принято) и эстетической (соответствие комплексов действующим нормам) целесообразности можно оценить зависимостью:

$$f_{01t,\Sigma} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^{n_{TK}} \left[K_{эфiC_1} \rightarrow \left\{ 1 - \sum_{j=2}^{4} R_{SC_j/C_1} \right\} (\max C_1) \right] \\ K_{эфC_2} \rightarrow R_{SC_2/C_1} \cdot R_{\alpha C_2} (\max C_2) \\ \sum_{i=1}^{n_{оп}} \left[K_{эфiC_3} \rightarrow R_{SC_3/C_1} \cdot R_{\alpha C_3} (\max C_3) \right] \\ K_{эфC_4} \rightarrow R_{SC_4/C_1} \cdot R_{\alpha C_4} (\max C_4) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

десь n_{TK}, n_{on} - соответственно число каналов связи с функциональными объектами и операторами; $R_{\alpha C_i}$ - показатель, характеризующий эффективность пользования оптимизационного ресурса в *i*-м направлении.

При комплексном решении проблемы снижения издержек на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений на основе построения трехуровневых оптимизационных моделей необходима единая база данных, сформированных в понятиях предметной области на всех уровнях процесса управления энегоресурсами, обеспечивающая возможность системного анализа развития ситуации энергетической сети, - серверный центр снижения издержек на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений, мониторинга технологического процесса применения ИСЗ.

Для снижения затрат на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений предложено создание в составе информационной автоматизированной системе (ИАС) единой базы данных – серверного центра снижения затрат на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений, мониторинга энергопотребителей в реальном времени и прогнозирование расхода электроэнергии интеллектуальных зданий ИСЗ (СЦНЗЭ МТП ИСЗ), (рис. 2). СЦНЗЭ МТП ИСЗ должен обеспечить возможность сбора обобщенной информации, ее формирования в понятиях предметной области 3-х уровней процесса управления энергетическими ресурсами и системного анализа размера затрат и ситуации по энергосбережению в регионе. Сбор информации для СЦНЗЭ как компонента интеллектуальной системы зданий и сооружений может выполняться по данным периодических

проверок технического состояния ИСЗ, при разрешении на установку, по результатам оперативного мониторинга состояния энергосбережения передвижными лабораториями, контроля по навигационной информации системы ГЛОНАСС/GPS. Для приема, архивирования информации и моделирования сценариев развития ситуаций энергосбережения могут быть использованы продукты ГИС-технологий.

Таким образом, в результате проведенного исследования [4] определены методологические подходы к совершенствованию системы мониторинга и управления энергетическими ресурсами при функционировании интеллектуальных зданий и сооружений. Предложенный серверный центр снижения затрат на энергопотребление в процессе эксплуатации инженерных систем и электрооборудования интеллектуальных зданий и сооружений, мониторинга энергопотребителей в реальном времени и прогнозирование расхода электроэнергии интеллектуальных зданий ИСЗ (СЦНЗЭ МТП ИСЗ) обеспечит накопление таких данных остро необходимо для выполнения многих видов планирования энергосбережения ресурсов и позволит повысить обоснованность управленческих решений, в том числе прогнозировать эффект введения ориентированных технологий в процесс эффективного управления энергоресурсами .

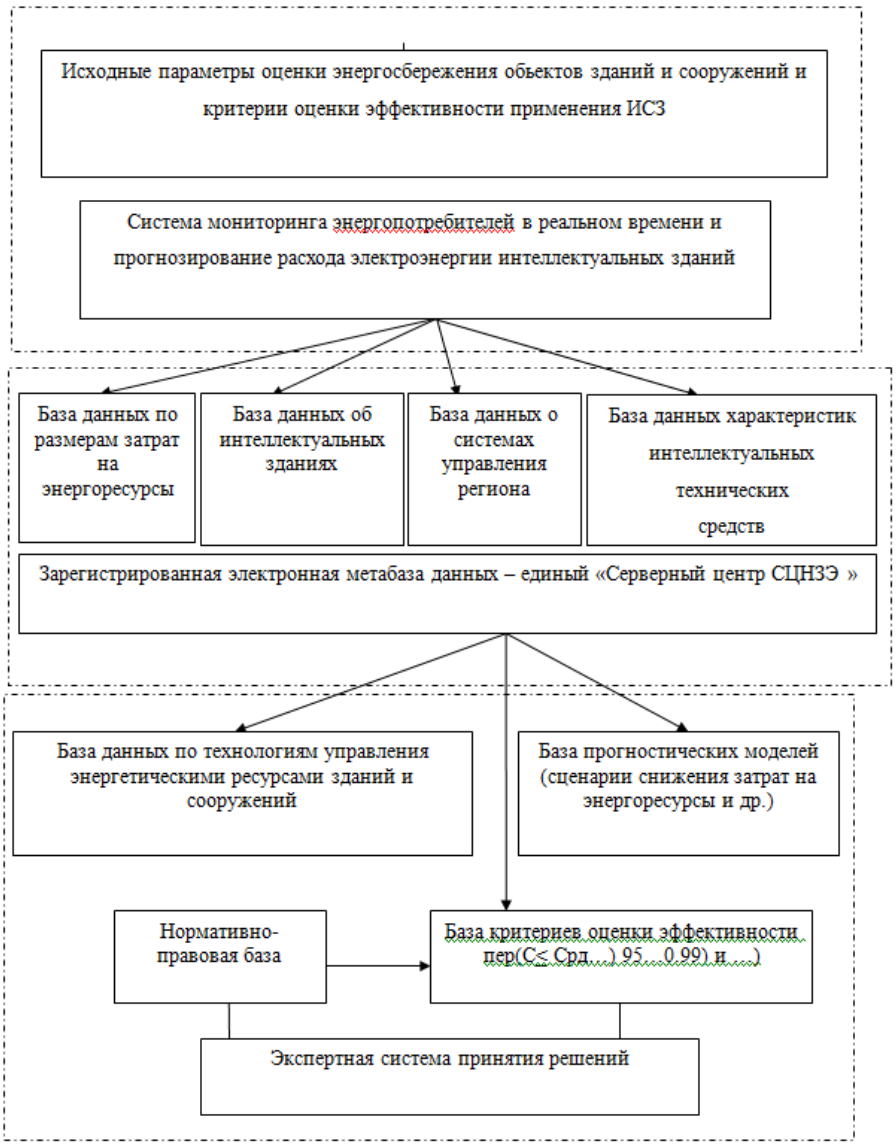


Рисунок 2. Структурно-функциональная схема автоматизированной информационной базы данных СЦНЗЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. KNX тренинг для проектировщиков. Schneider Electric: методическое пособие/ Тронд Хейем – М.: 2017. – 168с.

2. Safiullin R.N., Afanasyev A.S., Rezchenko V.V. The Concept of Development of Monitoring Systems and Management of Intelligent Technical Complexes. Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 237, p. 322-330. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.322

3. Кондратьев А. А. Барьеры внедренческих процессов ITS. – Сборник трудов Международной академии транспорта №17. – М.: 2014. – с. 89-91.

4. Сафиуллин Р.Н., Керимов М. А Средства фотовидеофиксации нарушений ПДД: нормативное регулирование и практика применения: монография [Средства фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения: регулирование и практика] М.А. Керимов, Р. Н. Сафиуллин – Москва: Директ-Медиа, 2016, - 355С..

5. Сафиуллин Р.Н., Керимов М.А. Интеллектуальные бортовые транспортные системы на автомобильном транспорте. Монография, М.-Берлин: Директ-Медиа,2017 –С.355

6. Тарифы на электроэнергию по Санкт-Петербургу [Электронный ресурс]: – https://www.pes.spb.ru/for_customers/electricity_tariffs/electricity_tariffs_for_st_petersburg/.

7. Козлов, Л. Н., Урличич, Ю. М., Циклис, Б. Е. О концептуальных подходах формирования и развития интеллектуальных транспортных систем в России // Транспорт Российской Федерации. — 2009. — № 3–4 (22–23).

8. Патент на ПМ №174174 РФ Автоматизированная система контроля данных о техническом состоянии двигателя внутреннего сгорания транспортного средства /. Сафиуллин Р.Н./ Опубл.05.10.2011. Бюл. № 28.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-235-240

Мунтян Евгения Ростиславна

Южный федеральный университет

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАФОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ[6]

Аннотация. *Для моделирования совместного действия объектов сложных технических систем (СТС) предложено использование нечетких графов. В статье рассматриваются два вида моделей, позволяющих учесть только однотипные связи (модель 1) и сочетание однотипных и разнотипных связей в графе (модель 2). Разработка обеих моделей выполнена при помощи программного модуля для представления акторов и отношений между акторами на основе графов. В работе показаны преимущества модели 2 для представления разнотипных отношений между объектами СТС. С целью снижения временных затрат на вычисления в моделях графов предложено дополнительное использование в модели множественных связей в виде вектора.*

Ключевые слова: *Нечеткий граф; моделирование; однотипные связи; разнотипные связи; множественные связи; сложная техническая система.*

Annotation: *The use of fuzzy graphs has been propose for modeling the joint action of objects of complex technical systems (CTS). The article discusses two types of models that allow to take into account only single-type relationships (model 1) and a combination of single-type and heterogeneous connections in a graph (model 2). The development of both models was carry out with help a software module for the representation of actors and relations between actors based on graphs. The paper shows the advantages of model 2 for representing different types of relations between objects of the JTS. In order to reduce the time spent on computation in graph models, an additional use in the model of multiple links in the form of a vector has been propose.*

Keywords: *Fuzzy graph; modeling; same type of edges; different types of edges; multiple edges; complex technical system.*

Введение.

Обзор литературных источников в области разработки и использовании сложных технических систем (СТС) позволяет сделать вывод об актуальности задачи моделирования таких систем с целью планирования совместного действия их объектов [1-3]. В данной работе моделирование СТС рассматривается на примере системы охраны периметра большой территориальной протяженности (СО). В качестве средства моделирования предлагается использование нечетких графов с учетом разнотипных и множественных связей.

Постановка задачи. Для охраны протяженного периметра с учетом вероятного наличия угроз несанкционированного физического проникновения потенциальных нарушителей (ПН), на территории которого находятся стационарные или подвижные объекты, предлагается использование необитаемых интеллектуальных взаимодействующих мобильных роботизированных платформ (НИВМРП). Требуется разработать модель системы охраны,

[6] Работа выполнена в рамках проектной части госзадания Минобрнауки России № 2.3928.2017/4.6 в Южном федеральном университете

позволяющей представить ее объекты и их возможные отношения с целью дальнейшего исследования их взаимодействия.

Под объектами СО в рамках данной задачи понимаются стационарные или подвижные объекты охраны (ОО), НИВМРП (технические устройства, предназначенные для сбора данных об ОО – ТУ), потенциальные нарушители охраняемого периметра (ПН), компьютер (как лицо, принимающее решение – ЛПР), обрабатывающий информацию о состоянии ОО и выдающий управляющие сигналы для ТУ. Совместное действие объектов СО обеспечивает функцию охраны периметра, в качестве отношений между ними рассматриваются удаленность ОО, ТУ, ПН, потоки данных и управляющих сигналов.

Планирование совместного действия объектов СО требует решения ряда задач, в том числе хранения и актуализации информации об ОО и ТУ, угрозах со стороны ПН [4,5], представления объектов СО и их отношений в модели, распределения зон влияния ТУ для наблюдения за ОО в зависимости от ресурсов устройств (радиус слежения, время жизнеспособности и др.), обобщение, доопределение модели и др.

Моделирование взаимодействия объектов СО.

Для исследования совместного действия объектов целесообразно использовать модели, которые позволяют представить сеть отношений между элементами, в том числе нейросетевые [6,7], когнитивные [8-10] и графовые модели [11]. В данном исследовании делается акцент на графовые модели. Модели теории графов хорошо изучены, для них разработано большое количество алгоритмов решения ряда задач, в том числе вычисления характеристик модели. Результаты вычисления характеристик в условиях придания им смысловой нагрузки могут быть использованы для исследования модели при решении практических задач предметной области [12-14]. Однако, для моделирования СТС моделей классической теории графов с учетом однотипных связей может оказаться недостаточно, в связи с чем требуется введение разнотипных связей. Например, в работе [15] обосновано использование разнотипных связей для представления отношений между субъектами в графе для решения задач в социальных системах.

Для моделирования взаимодействия объектов СО предлагается использование нечеткого графа $G = (Gv, Ge)$, заданного конечными множествами вершин $Gv = \{gv_1, gv_2, \ldots, gv_n\}$ и ребер графа $Ge = \{ge_1, ge_2, \ldots, ge_m\}$. Вершины $gv_i \in Gv$ представляют объекты СО, а ребра $ge_j \in Ge$ – отношения между объектами. Атрибутами вершин в графе G' могут быть весовые коэффициенты η, а атрибутами ребер – веса (μ), ориентация, вид связи. При этом, ребра могут быть ориентированными ($gv_i \rightarrow gv_j$) или неориентированными ($gv_i - gv_j$), а по видам связи – однотипными ($gv_i - gv_j$ и $gv_i \rightarrow gv_j$) и разнотипными ребрами (связи $gv_i - tp - gv_j$ и $gv_i - tp \rightarrow gv_j$, где tp – $type$).

Весовым коэффициентам вершин и связей ($\eta \in [0; 1]$ и $\mu \in [0; 1]$) может придаваться различный смысл например, степени достоверности или принадлежности нечеткому множеству. Веса вершин и связей могут быть постоянными или вычисляемыми посредством фаззификации [16,17]. Поскольку ребра в графе G могут быть разнотипными, то и их веса тоже могут интерпретироваться по-разному в зависимости от смысловой нагрузки. Вес ребра μ_i в графе G может интерпретироваться как степень удаленности объектов или мера достоверности передачи информации между ними, а вес вершины η_i – мера значимости или назначения объекта.

С целью обоснования необходимости использования перечисленных выше видов связи в графах рассмотрим представление объектов СО на примере двух моделей:

1. граф $G1$ с учетом однотипных связей;
2. граф $G2$ с учетом однотипных и разнотипных связей.

Реализация моделей выполнена с помощью программного модуля (ПМ) [18,19].

Модель 1. Смешанный нечеткий граф $G1$, моделирующий систему охраны с учетом однотипных связей, представлен на рисунке 1.

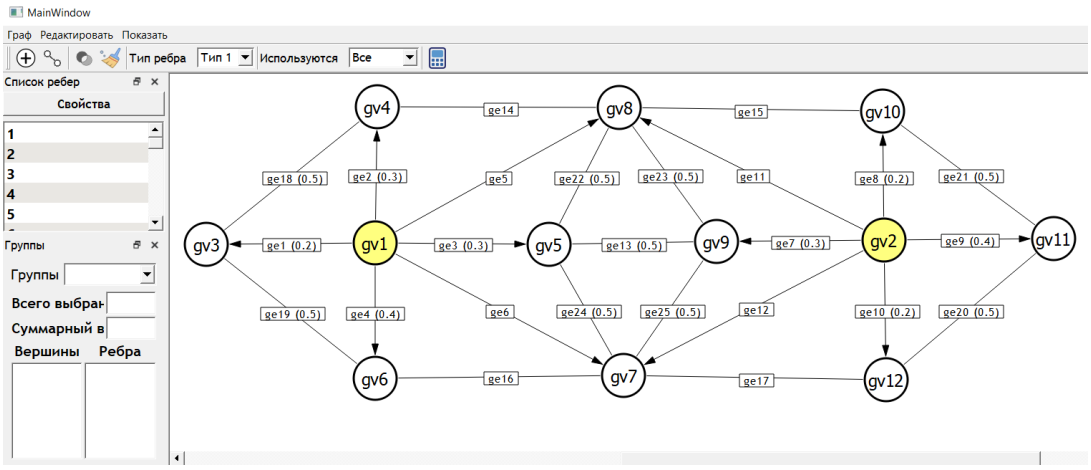


Рис. 1. Граф *G*1 с учетом однотипных связей

Граф *G*1 задан множествами вершин $G1v = \{gv_1, gv_2, \ldots, gv_{12}\}$ и ребер $G1e = \{ge_1, ge_2, \ldots, ge_{25}\}$. При этом, в графе вершины gv_1, gv_2 представляют $ТУ_1$, $ТУ_2$, а вершины gv_3-gv_{12} – охраняемые объекты $ОО_1$-$ОО_{10}$. В модели сочетаются однотипные связи двух видов: ориентированному ребру ($gv_i \rightarrow gv_j$) придается смысл связи ТУ и ОО (отношение «наблюдать»), неориентированному ребру (gv_i – gv_j) – связи между ОО (отношение «связь ОО»). При этом веса ребер соответствуют степени удаленности объектов. Для оценки значения показателей весов ребер графа *G*1 и рассмотренных далее *G*2 и *G*3 введено вербальное описание (таблица 1).

Таблица 1 – Оценка значения показателя весов ребер ge_1-ge_{25} графов *G*1-*G*2

Вербальное описание показателя	Численное значение веса
Отсутствует	0
Очень слабый показатель	[0,91, 1]
Слабый показатель	[0,71, 0,9]
Умеренный показатель	[0,51, 0,7]
Сильный показатель	[0,31, 0,5]
Очень сильный показатель	[0,1, 0,3]

Следует отметить, что ограничение на однотипность использованных связей в графе *G*1 не позволил задать в модели ЛПР, предназначенного для приема и выдачи разнотипных (информационных и управляющих) сигналов. Данная проблема решена в модели 2.

Модель 2. Такая модель позволяет сочетать однотипные и разнотипные ребра, что дает возможность представить ЛПР и совокупность различных информационных и управляющих сигналов. Смешанный нечеткий граф *G*2, предназначенный для моделирования СО с учетом однотипных и разнотипных связей, представлен на рисунке 2.

Граф *G*2 задан множествами вершин $G2v = \{gv_1, gv_2, \ldots, gv_{13}\}$ и ребер $G2e = \{ge_1, ge_2, \ldots, ge_{33}\}$. Отличия графа *G*2 от модели 1: вершина gv_{13} (представляет $ЛПР_1$) и разнотипные ребра ge_{29}, ge_{33} (gv_i – $tp \rightarrow gv_j$), ge_{26}-ge_{28}, ge_{30}-ge_{32} (gv_i – tp – gv_j). Неориентированные разнотипные ребра в графе демонстрируют возможность передачи информации по различным каналам: tp_1 – «*Wi-fi*», tp_2 – «*Bluetooth*», tp_3 – «низкочастотный радиоканал», а их веса соответствуют вероятностям использования канала. Ориентированные ребра задают действия объектов, например, tp_4 – «управлять движением», при этом их вес соответствует заданному направлению движения.

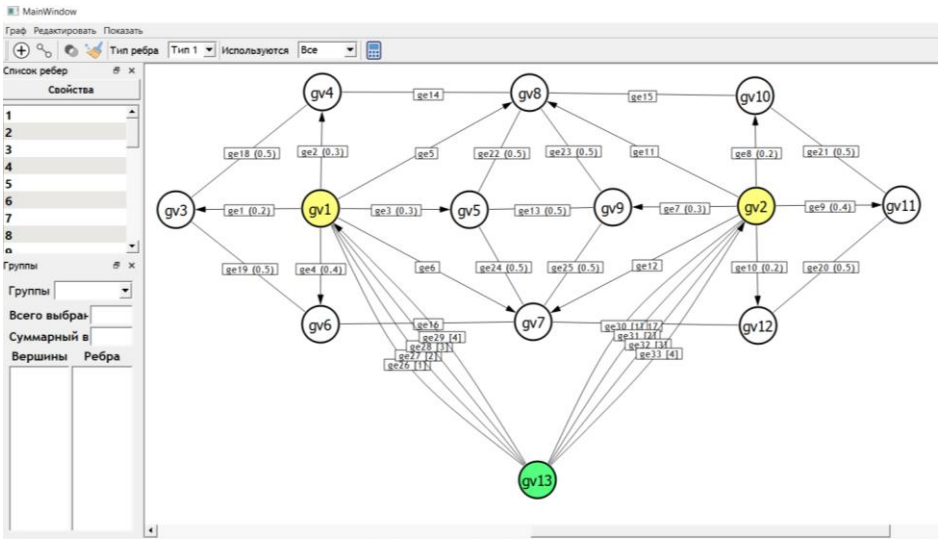


Рис. 2. Граф *G*2 с учетом однотипных и разнотипных связей

Предложенная на рисунке 2 модель в виде графа *G*2 позволила задать все необходимые отношения между объектами СО за счет сочетания однотипных и разнотипных связей. Однако, графы, моделирующие СТС, могут достигать значительных размеров. В таком случае использование разнотипных связей может привести к значительному росту числа ребер в модели, что в свою очередь приведет к увеличению временных затрат на организацию вычислений в модели с целью ее исследования.

Для решения обозначенной проблемы в работе [15] предлагается объединение ряда разнотипных связей в одну множественную связь в виде вектора $\bar{v}$, причем в зависимости от ориентации разнотипных связей это могут быть связи вида $gv_i - \bar{v} \rightarrow gv_j$ и $gv_i - \bar{v} - gv_j$. Ребро в виде вектора представляется в виде кортежа $\bar{v} = <v_1, v_2, \ldots, v_t>$, где t – размерность вектора или кратность ребра $\bar{v}$. Каждое ребро в векторе v_i имеет свой индекс и свой вес.

Проанализировав вышесказанное, можно сделать вывод о целесообразности использования множественных и разнотипных связей в моделях графов для представления сложных отношений между объектами СТС. Использование разнотипных связей позволяет задать разнотипные отношения в модели, но при этом приводит к росту временных затрат на организацию вычислений. С другой стороны, множественные связи в виде вектора в совокупности с разнотипными связями позволяют задать полный спектр требуемых в модели отношений и, при этом снижают время на вычисления по сравнению с моделью 2. Полученные выводы следует учесть при разработке моделей для решения прикладных задач в СТС.

Исследование модели возможно выполнить с учетом результатов вычисления характеристик, например, центр, радиус, диаметр графа, в условии придания им смысловой нагрузки. Отмеченные в статье ранее задачи представления объектов СО и их отношений в графах, распределения зон влияния ТУ для наблюдения за ОО и т.д. требуют разработки определенных средств для функционирования модели. Например, предложено:

- использование списков ребер [20,21] для представления вершин и связей графа;
- алгоритм свертки графа [22,23] для обобщения модели, что особенно актуально в случае ее больших размеров;
- алгоритм разделения графа, основанный на применении алгоритма свертки [24,25];
- алгоритм догенерации графа для доопределения модели в случае неполных исходных данных или для прогнозирования поведения модели реального размера в случае ее увеличения [26,27].

Заключение.

Для планирования совместного действия объектов сложных технических систем предлагается использование моделей на основе нечетких графов, в которых для представления существующих отношений между объектами СТС обосновывается применение разнотипных и множественных связей. Использование множественных связей позволяет уменьшить число ребер в модели, что дает возможность снизить временные затраты на организацию вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мосолов А.С., Графова О.В., Кашев А.В. Обзор европейских патентов на методы проектирования систем инженерно-технической защиты // Известия ЮФУ. Технические науки, 2010. – № 11 (112). – С. 23-27.
2. Полянский И.С., Беседин И.И., Панин Б.Л. Математическая модель комплекса инженерно-технических средств системы физической защиты объекта охраны // Фундаментальные исследования. Технические науки, 2013. – №6. – С. 1359-1365.
3. Балута В.И., Яковенко О.Ю. Формализация описания сложного поведения объектов в задачах имитационного моделирования систем физической защиты // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. – № 3. – 32 с.
4. Гамисония А.С., Костюк А.И. Сравнительное исследование методов создания цифрового описания данных охраняемых объектов в геоинформационных системах // Сборник трудов IV Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». Таганрог, 2018. – С. 213-218.
5. Костюк А.И. Структуры данных системы цифрового описания данных средств охраны и мониторинга объектов // Современные наукоемкие технологии, 2017. – № 12. – С. 43-48.
6. Белявский 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.
7. Шестаков А.В., Мунтян Е.Р., Потапов В.В., Терлецкий В.В. Моделирование нейросетевых взаимодействий с использованием механизма клеточных автоматов // Политематический 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).
8. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 351 с.
9. Korobkin V.V., Kolodenkova A.E. Diagnosis in SEMS based on cognitive models: group interaction // Studies in Systems, Decision and Control, 2019. – Vol. 174. – P. 275-284.
10. Колоденкова А.Е. Топологический анализ структуры нечеткой когнитивной модели оценки реализуемости проекта по созданию информационно-управляющих систем для сложных технических объектов // Вестник УГАТУ, 2016. – Т. 20. – № 3 (73). – С. 129–136.
11. Гейда А.С. Моделирование при исследовании технических систем: использование некоторых расширений теории графов. Труды СПИИРАН, 2011. – 2 (17), – С. 234-245.
12. Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р. Локализация вершин графа для задач представления объектов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2017. – №7. – С. 144-154.
13. Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р. О решении некоторых задач, возникающих при моделировании взаимодействия социальных групп // VIII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 240-249.
14. Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р. О проблемах при моделировании взаимодействия социальных групп // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным

технологиям «IS&IT'17». Научное издание в 3-х томах. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А., 2017. – Т. 2. – С. 149-151.

15. Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р. Использование списков для представления социальных отношений // Журнал «Информатизация и связь», 2018. – №4. – С. 43-49.

16. Аверкин А.Н., Батыршин И.З. и др. Нечеткие множества в моделях управления искусственного интеллекта // Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986.

17. Берштейн Л.С., Боженюк А.В. Нечеткие графы и гиперграфы. – М.: Научный мир, 2005, 256 с.

18. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018665499. Программный модуль для представления акторов и отношений между акторами на основе графов / Е.Р. Мунтян. Зарег. 05.12.2018. – М.: Роспатент, 2018.

19. Мунтян Е.Р. Разработка программного комплекса для моделирования взаимодействия акторов и их групп на основе графов // Инновационные технологии и дидактика в обучении: сборник статей международной научно-практической конференции. Том 1. − Таганрог: Издательство ЮФУ, 2018. − С. 74-78.

20. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы. Построение и анализ, 3-е издание. – М.: Вильямс, 2013. – 1328 с.

21. 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.

22. Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V. Modern approaches to modeling of risk situations during creation complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 875. – P. 209-217.

23. Muntyan E., Sergeev N., Tselykh A. Analysing Big Social Graphs Using a List-based Graph Folding Algorithm // ITM Web of Conferences (ICICCI 2018), 2019. – Vol 25. https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/abs/2019/02 /itmconf_icicci2018_01003/ itmconf_icicci2018_01003.html.

24. Мунтян Е.Р. О задаче разделения графа на пропорциональные подмножества вершин // Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "ИНФОТЕХ – 2017": Сборник статей всероссийской научно-технической конференции – г. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 71-73.

25. Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р. Применение алгоритма свертки для разделения графа на пропорциональные подграфы // Вестник УГАТУ, 2018. – Т. 22, №1 (79). – С. 121-130.

26. Мунтян Е.Р. О задаче догенерации графа при моделировании взаимодействия социальных // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Двенадцатой конференции с международным участием – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. – С. 99-100.

27. Мунтян Е.Р. Подходы к догенерации графа репрезентативной выборки для моделирования взаимодействия социальных групп // Журнал «Информатизация и связь», 2018. – №4. – С. 18-24.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-241-248

Колпащиков Сергей Александрович, Данилушкин Иван Александрович

Самарский государственный технический университет

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРА ОПЕРАТОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Аннотация. *В докладе рассмотрены способы построения компьютерного тренажёра, имитирующего существующий интерфейс автоматизированного рабочего места оператора. Представлена модульная структура, обеспечивающая высокую гибкость и универсальность аппаратно-программного комплекса тренажера. Рассмотрены особенности разработки динамической модели технологического процесса для тренажёра оператора парового котла. Описана модульная структура алгоритмического обеспечения модели, методы, применённые при разработке моделей отдельных технологических процессов.*

Ключевые слова: *тренажерный комплекс, модульная структура, автоматизированная разработка, технологический процесс, АСУ ТП, паровой котёл*

Abstract. *The paper describes building a computer simulator that simulates the existing interface of the operator's workstation. A modular structure is presented that provides high flexibility and versatility of the hardware-software complex of the simulator. The characteristic properties of developing a dynamic model of the technological process for the simulator of the steam boiler operator are considered. The modular structure of the algorithmic description of the model, the methods used in the development of the separate technological processes models are described.*

Keywords: *training complex, modular structure, computer-aided engineering, technological process, process control system, steam boiler*

Введение

Повышение адекватности восприятия оператором технологического процесса и уверенности в его действиях в штатных и аварийных режимах работы АСУ ТП, требующих вмешательства персонала, достигается регулярными тренировками в условиях, приближенных к реальным. Современный подход к решению такой задачи – тренажер, компьютерный тренажер [1, 2].

Задачи тренажера:

- моделирование поведения технологического объекта;
- моделирование работы АСУ ТП;
- формирование процесса обучения.

Разработка тренажерного комплекса требует решения ресурсоемких и разнородных задач. Требуется автоматизация процесса разработки тренажеров. На рынке представлены коммерческие специализированные пакеты [1]. Эти пакеты включают в себя все задачи: моделирование технологического объекта и систем управления, визуализацию технологического процесса, обучение и оценивание.

Структура тренажёра

Применение пакетов для разработки тренажеров имеет ряд недостатков [3]. Первым недостатком является ограниченность математических моделей, заложенных в пакет, точнее ориентированность моделей на конкретную промышленность, например, множество пакетов ориентировано на нефтеперерабатывающую промышленность. Применение таких пакетов для других отраслей часто сопряжено с трудностями реализации.

Вторая проблема – это проблема идентичности тренажера реальной АСУ ТП. Обычное требование к тренажерам, применяемым для обучения оперативного персонала – это полная идентичность визуального представления и алгоритмического обеспечения системы управления, защит и блокировок. Перенос точной копии реального проекта АСУ ТП в другую систему – это ресурсоемкая задача, требующая дополнительно разработки процедуры верификации нового проекта. Задача идентичности визуального представления обычно решается применением интерфейса АРМ оператора, реализованного в проекте SCADA-системы для реальной АСУ ТП. Иногда удается использовать реальный проект для контроллера, запуская проект в эмуляторе, поставляемого производителем контроллера. Кажущимся на первый взгляд экзотическим, но чаще всего коммерчески оправданным является вариант использования в составе тренажера физического контроллера, идентичного используемому в АСУ ТП, но без модулей ввода-вывода, которые составляют львиную долю стоимости. Такие решения резко снижают затраты на разработку идентичного тренажера, но также имеют ряд ограничений.

Стандартный подход к решению указанных проблем – модульный принцип организации и реализации автоматизированной системы разработки тренажеров оператора технологических процессов [1, 3].

Каждый модуль должен быть самодостаточным, при этом обмен данными между модулями должен осуществляться по стандартным протоколам, широко применяемым в АСУ ТП. Такой подход позволит тиражировать с минимальными изменениями отдельные компоненты тренажера. Например, тренажеры для однотипного оборудования на разных энергетических предприятиях. Комплексы АСУ ТП типовых котлоагрегатов и турбоагрегатов даже в рамках одной станции могут быть реализованы на различных аппаратно-программных платформах.

Модульная структура тренажера представлена на рисунке.

Структура тренажера и соответственно программного обеспечения для его автоматизированной разработки включает четыре основных модуля соответствующих задачам тренажера.

Потоки данных между модулями зависят от направления передачи. В направлении «Система обучения – Модель объекта» передаются начальное состояние переменных, момент возникновения и параметры аварийных ситуаций. В направлении «Модель объекта – Система обучения» – текущие значения параметров для системы оценивания не передаваемые в виртуальный контроллер. В направлении «Система обучения – Виртуальный контроллер» – начальное состояние запорной и регулирующей арматуры, уставки регуляторов. В направлении «Виртуальный контроллер – Система обучения» – текущее значение переменных для оценивания качества выполнения тренировки. В направлении «Система обучение – Визуализация» – доступные сценарии с их параметрами, ход и оценка выполнения выбранного сценария. В направлении «Визуализация – Система обучение» – выбранный сценарий, признаки выполнения внешних по отношению к АСУ ТП операций (телефонный звонок-оповещение, визуальный осмотр, и т.п.).

Модуль «Модель объекта» предлагается разделить на два подмодуля. Модуль, моделирующий поведение объект и модуль, моделирующий датчики технологических параметров и исполнительные механизмы. Модуль датчиков и исполнительных механизмов реализует шлюз между моделью и виртуальным контроллером и реализует специфические для моделируемого оборудования неисправности в рамках сценариев обучения. Модуль позволяет без изменений в математической модели объекта менять типы датчик и исполнительных механизмов.

Модуль «Визуализация» разделен на два подмодуля. Основной – реализующий идентичную реальному АСУ ТП визуализацию технологического процесса. Дополнительно вводится модуль, реализующий работу с системой обучения. Здесь осуществляется выбор тренировок просмотр результатов обучения и тестирования, а также формирование внешних по

отношению к реальной АСУ ТП операция. Внешние операции – визуальный осмотр, оповещение персонала, управление неавтоматизированными органами.

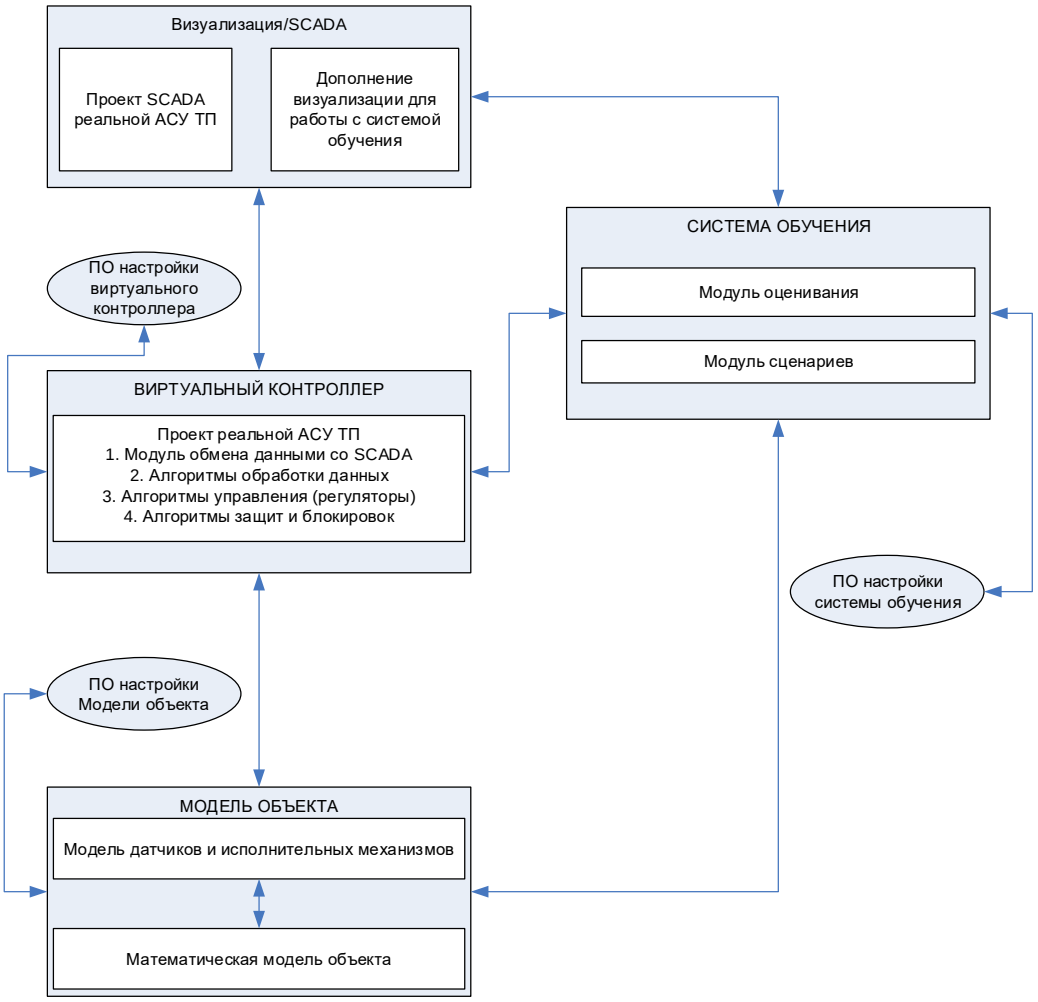


Рисунок – Модульная структура тренажера

Все взаимодействие между основными модулями должно осуществляться по стандартным протоколам, в случае необходимости между модулями должен устанавливается шлюз протоколов. Это позволяет использовать уже отлаженный модуль, например, «Виртуальный контроллер» без изменений, с различными реализациями модуля «Визуализация». Кроме того, такой подход позволяет любой из модулей конкретного тренажера заменять на программное или аппаратное обеспечение третьей стороны: SCADA система, эмулятор контроллера или аппаратный контроллер, система моделирования динамических объектов с поддержкой промышленных протоколов. Особо можно отметить, что такой подход позволяет реализовывать распределение функций каждого из модулей на нескольких его экземплярах, которые могут исполняться на различных узлах локальной сети.

Современный подход в компьютерных тренажерах подразумевает максимальную идентичность его работы для обучаемого, что требует введение в структуру физических пультов управления идентичных реальным. В данной структуре реализация пульта на основе физического ПЛК, соответствует распределению функций контроллера на нескольких экземплярах «Виртуального контроллера».

Недостатком такого подхода являются накладные расходы на синхронизацию работы модуля «Виртуальный контроллер» и модуля «Модель объекта», что значительно затрудняет реализацию ускоренного режима моделирования.

Реализация математической модели объекта несколькими экземплярами модуля «Модель объекта» позволяет разрабатывать несколько независимых модулей узко специализированных для объектов конкретных областей и даже отдельных типов оборудования, объединяя их на уровне модуля «Модель датчиков и исполнительных механизмов».

В рамках разработки и тренажера оператора парового котла была разработана библиотека для формирования модуля «Модель объекта».

Обзор вариантов создания моделей паровых котлов

Математическое модели технологических процессов генерации пара создаются на протяжении нескольких десятков лет для решения самых разнообразных задач [4–6]. Среди подобных задач выделяются задачи поиска оптимальных настроек систем автоматического управления параметрами технологического процесса, задачи поиска оптимальных режимов эксплуатации технологического оборудования, задачи оптимального проектирования котлоагрегатов. Каждая группа задач требует своего типа моделей. Синтез автоматических систем управления требует разработки моделей, описывающих динамику технологических процессов в режиме работы оборудования. Поиск оптимальных режимов работы оборудования осуществляется с помощью статистического анализа истории эксплуатации парового котла. Проектирование котлоагрегатов в первую очередь базируется на моделях процессов теплопередачи [4]. Большинство моделей при этом описывает технологические процессы в режимах работы, близких к номинальным.

При создании компьютерного тренажёра модель котла должна обеспечивать адекватное поведение параметров в широком диапазоне их изменения, поскольку наиболее сложными и важными являются режимы подготовки и пуска основного и вспомогательного оборудования парового котла. Во время выхода на режим динамические характеристики процесса генерации пара существенно меняются. Физические параметры воды и перегретого пара претерпевают значительные изменения, что не позволяет использовать линеаризованную модель номинального режима работы. Поэтому при создании компьютерного тренажёра оператора котельного цеха необходима разработка комплексной динамической модели парового котла.

Требования к математической модели парового котла

Зона ответственности машиниста котельного цеха начинается от задвижки перед регулирующим клапаном питательной воды на трубопроводе питательной воды и заканчивается запорной арматурой подключения котла к паропроводу острого пара. Основными параметрами функционирования котла являются температура и давление перегретого пара на выходе котла. Однако, параллельно с поддержанием этих параметров машинист должен следить за поддержанием уровня в барабане котла, соотношением расходов газа и воздуха, давлением в топке котла, температурой металла барабана котла и трубопроводов пароперегревателя, температурой уходящих газов в шахте. Таким образом, оператор должен следить за состоянием двух десятков основных и нескольких сотен вспомогательных параметров.

Тренажёр создавался для выработки навыков оперативного управления основным и вспомогательным оборудованием парового котла. При большом объёме анализируемой информации необходимо, чтобы оператор понимал причинно-следственные связи изменения параметров, а также ощущал динамику их поведения. В связи с этим основное требование к математической модели – адекватное представление динамических характеристик значимых технологических параметров процесса.

Из трёх сотен аналоговых параметров, отображающихся в интерфейсе автоматизированной системы управления паровым котлом, были выделены основные

параметры, моделирование которых осуществлялось с высокой точностью. Остальные параметры моделировались с меньшей точностью.

К тренажёру предъявлялось ещё одно существенное требование: интерфейс тренажёра должен обеспечивать точную копию автоматизированного рабочего места оператора. Для удовлетворения этого требования была предложена специальная структура программно-аппаратного комплекса тренажёра.

Структура модели парового котла

Модель котла разрабатывалась для реализации на языке визуального программирования, подобного языку FBD – языку функциональных блоков стандарта МЭК 61131-3, поэтому она представляет собой группу блоков-алгоритмов, связанных между собой по основным технологическим параметрам.

В отдельные блоки выделены следующие технологические процессы котлоагрегата:

1) водяной тракт котла. Блок рассчитывает значения параметров технологического процесса на участке от задвижки подачи питательной воды до барабана котла;

2) барабан котла. Блок реализует модель температуры металла барабана котла;

3) пароперегреватель. Блок моделирует параметры пара и температуры металла пароперегевателя в процессе нагрева на участке от барабана котла до паросборной камеры;

4) подача газа. Блок реализует расчёт параметров газа на участке от запорной арматуры подачи газа в газопровод котла до горелок котла;

5) газовоздушный тракт. Блок рассчитывает параметры воздуха и уходящих газов на участке от шиберных заслонок перед направляющими аппаратами дутьевых вентиляторов до шиберных заслонок после дымососов;

6) температура уходящих газов. Блок реализует расчёт температур уходящих газов на участке от первой точки контроля в шахте котла до шиберных заслонок после дымососов.

Водяной тракт котла

Входными параметрами алгоритма являются: – давление и температура питательной воды на входе узла питания; – значения гидравлических сопротивлений водяного тракта, трубопроводов непрерывной продувки; – расход газа; – расход пара из барабана котла.

Выходными параметрами алгоритма выступают: – уровень в барабане котла; – давление и температура в барабане котла; – расход питательной воды.

Гидравлическое сопротивление водяного тракта рассчитывается исходя из степени открытия регулирующего клапана подачи питательной воды, а также состояния запорной арматуры узла питания и их байпасов. Учёт состояния запорной арматуры необходим, поскольку при подготовке к пуску котла из холодного состояния, машинист должен выполнить последовательность операций по прогреву трубопровода, подавая питательную воду через байпасы основной запорной арматуры. Расход питательный воды рассчитывается как квадратный корень из отношения разности давлений на входе и в барабане котла к гидравлическому сопротивлению водяного тракта.

Расчёт давления и температуры пароводяной смеси в барабане котла основывается на уравнении энергетического баланса [7]. Существенное изменение физических параметров воды при нагреве от 80 до 340 градусов Цельсия и при росте давления от нуля до 16 МПа учитывается с помощью перехода от значений давления и температуры теплоносителя к значению энтальпии. Чем выше удельное значение энтальпии пароводяной смеси в барабане котла, тем выше температура и давление насыщенного пара. Количество тепла, поступающего от сгорания газа прямо пропорционально расходу газа. Такой подход позволил упростить модель, не прибегая к моделированию процессов горения и теплоотдачи в топочных экранах котла и, в то же время, обеспечил достаточную точность модели.

Уровень в барабане котла рассчитывается по закону материального баланса.

Барабан котла

Входными параметрами алгоритма являются координата точки контроля температуры и температура пароводяной смеси в барабане котла. Выходным параметром алгоритма является температура металла барабана котла в заданной точке.

Барабан котла представляет собой сварной цилиндр длиной 18 м, диаметром 1800 мм, с толщиной стенки 110 мм. При таких габаритах становится крайне важным обеспечить равномерный прогрев металла во избежание чрезмерных термодинамических напряжений. Поэтому температура металла контролируется в нескольких точках поверхности. Модель температуры металла строится на базе решения одномерного параболического уравнения в частных производных с граничными условиями первого порядка [8].

Пароперегреватель

Входными параметрами алгоритма являются: – давление и температура пара в барабане котла; – давление пара в паросборной камере; – расход газа; – гидравлические сопротивления трубопроводов подачи воды на впрыски пароохладителей.

Выходными параметрами являются значения температур пара и металла пароперегревателя в точках контроля.

Алгоритм представляет собой последовательное соединение блоков, каждый из которых представляет собой модель процесса теплообмена в соответствующей ступени пароперегревателя. Процесс теплообмена в каждой ступени моделируется единообразно, на основе уравнения энергетического баланса. Настроечными параметрами модели выступают площадь конвективного теплообмена, и масса стали, из которой изготовлены трубки теплообменника. При идентификации модели были подобраны коэффициенты пропорциональности тепла, аккумулированного металлом теплообменника в единицу времени, расходу газа. Количество тепла, отбираемого паром у стенок теплообменника, а также температура пара на выходе теплообменника рассчитываются исходя из расхода пара, пропорционально разности температур металла и пара. В модели теплообменника учтена переменная скорость потока пара, которая изменяется пропорционально расходу пара.

Расход пара через пароперегреватель рассчитывается как квадратный корень из перепада давлений в барабане котла и паросборной камере, отнесённого к гидравлическому сопротивлению пароперегревателя. Гидравлическое сопротивление пароперегревателя определено исходя из реальных данных эксплуатации котла. Для повышения точности модели в модель введена зависимость гидравлического сопротивления пароперегревателя от температуры пара на его выходе.

Гидравлические сопротивления линий впрысков зависят от степени открытия регулирующих клапанов и запорной арматуры линий впрысков. Температура пара после впрысков рассчитывается исходя из уравнения энергетического баланса.

Подача газа

Входными параметрами алгоритма являются: – давление газа на перед задвижкой подачи газа на котёл, – степени открытия запорной арматуры, регулирующих и защитных клапанов, свечей сброса.

Выходными параметрами алгоритма являются: – давление газа после регулирующего клапана подачи газа на котёл; – давление газа перед и после регулирующих клапанов горелок; – общий расход газа на котёл; – расход газа через каждую горелку котла.

Алгоритм расчёта реализует расчёт гидравлической схемы, в которой сопротивления участков зависят от степени открытия соответствующей арматуры и регулирующих клапанов. При расчёте параметров газопровода принимается, что давление за горелками, в топке котла, постоянно и равно нулю. Такой подход упрощает схему расчёта и повышает устойчивость алгоритма. Точность расчёта снижается несущественно. Зависимость гидравлических сопротивлений от степени открытия регулирующих клапанов идентифицирована по реальным данным эксплуатации котла.

Газовоздушный тракт

Входными данными алгоритма выступают: – признаки включения дутьевых вентиляторов и дымососов; – степени открытия направляющих аппаратов дутьевых вентиляторов и дымососов; – степени открытия регулирующих клапанов подачи воздуха к горелкам котла; – степени открытия шиберов газовоздушного тракта; – расход газа.

Выходными данными алгоритма выступают: – расход воздуха к каждой горелке; – давление воздуха в различных точках газовоздушного тракта (после дутьевых вентиляторов, после регенеративного воздухоподогревателя, перед горелками, в топке, перед регенеративным воздухоподогревателем, перед направляющими аппаратами дымососов).

Алгоритм реализует модель в виде двух последовательно соединённых замкнутых динамических систем с обратными связями. Первая система моделирует расход воздуха на участке от воздухозабора до топки. Расход воздуха в топку рассчитывается как квадратный корень из разности давлений после дутьевого вентилятора и давления в топки, отнесённого к гидравлическому сопротивлению воздушного тракта. Гидравлическое сопротивление определяется исходя из степени открытия регулирующих клапанов подачи воздуха к горелкам. Конструктивное исполнение котла определяет использование двух дутьевых вентиляторов, работающих на общий воздуховод подачи воздуха к горелкам. Поэтому гидравлическая схема модели должна учитывать все возможные перетоки воздуха. Для её моделирования использовался метод узловых давлений [9]. Обратная связь по расходу воздуха в топку определяет давление, создаваемое дутьевым вентилятором. Функциональная зависимость давления от расхода воздуха и степени открытия направляющего аппарата задана в табличном виде по номограмме характеристики дутьевого вентилятора.

Аналогичным образом моделируется вторая система, где расход определяется разностью давлений в топке и разряжением перед дымососом. Обратная связь по расходу уходящих газов используется для расчёта разряжения перед дымососом, которая задана в виде функциональной зависимости от расхода и степени открытия направляющих аппаратов дымососа.

Заключение

Предложенный подход к реализации тренажера позволяет гибко изменять его состав, проводить поэтапную разработку и упрощает тиражирование решений. Реализация подсистем тренажера в виде отдельных программных модулей позволяет компоновать тренажер только требуемой функциональностью и использовать в качестве отдельных его составляющих произвольные программные и даже аппаратные модули различных разработчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. – М.: СИНТЕГ, 2009. – 372 с.

2. Колпащиков С.А. Обобщенная структура компьютерного тренажера оператора технологического процесса// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Выпуск №7(28)–2010: Самара: СамГТУ, 2010. С. 221–224.

3. Дозорцев В.М., Агафонов Д.В., Назин В.А., Новичков А.Ю., Фролов А.И. Компьютерный тренинг операторов: непреходящая актуальность, новые возможности, человеческий фактор// Автоматизация в промышленности №7,2015. – С. 8–20.

4. Теплогидравлические модели оборудования электрических станций / Под общ. редакцией Г.А. Филиппова, Ф.Ф. Пащенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 448 с.

5. F. Alobaid, N. Mertens, R. Starkloff, T. Lanz, C. Heinze, B. Epple Progress in dynamic simulation of thermal power plants // Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 59, 2017, P. 79-162.

6. Беднаржевский В.С. Разработка математических моделей и программных средств для проектирования энергетических котлоагрегатов: Автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.13.18. Барнаул: Алтайск. гос. ун-т, 2004. 36 с.

7. Данилушкин И.А., Колпащиков С.А. Моделирование водяного тракта парового котла// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Выпуск №2(62)–2019: Самара: СамГТУ, 2019. С. 20–35.

8. Данилушкин И.А., Сыров И.М. Моделирование температурного распределения стенки барабана котла// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Выпуск №2(58)–2018: Самара: СамГТУ, 2018. С. 16–20.

9. Методы и алгоритмы расчёта тепловых сетей/ Хасилев В.Я., Меренков А.П., Каганович Б.М. и др. Под общ. ред. Хасилева В.Я. и Меренкова А.П. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-249-256

Немудрук Максим Леонидович, Федоров Михаил Степанович, Шпаковская Ирина Игоревна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ПЕРЕКАЧКИ ТЕМНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Аннотация. *В работе формализована проблема регистрирования кавитационных режимов винтовых насосов. Приводятся возможные подходы решения задачи. Алгоритм «усредненного оператора» – формализованный со слов оператора в виде продукционных правил типа «ЕСЛИ-ТО». Применения нейронной сети – модель диагностирования режимов оператором, составленная на базе исторических данных.*

Ключевые слова: *кавитация, винтовые насосы, нейронная сеть, диагностирование, нефтепродукты*

Annotation. *The article formalizes the problem of registering the cavitation modes of screw pumps. Possible approaches to solving the problem are given. The "averaged operator" algorithm is formalized according to the operator in the form of production rules of the type "IF-THEN". Applications of a neural network - a model of diagnosing modes by the operator, based on historical data.*

Keywords: *cavitations, screw pumps, neural network, diagnostics, oil products*

Введение

Основные процессы на перевалочных нефтебазах состоят из непрерывно-циклических технологических операций по приему нефтепродуктов в резервуарные парки, хранению и отгрузке. На рис. 1 приведена упрощенная технологическая схема слива темных нефтепродуктов (мазутов различных марок) с железнодорожных цистерн. Процесс складывается из операций разогрева нефтепродуктов в цистернах Ц и перекачки в резервуарный парк. Мазут с установки нижнего слива цистерны, пройдя фильтры очистки от механических примесей Ф и буферную емкость БЕ, поступает на один из насосов Н и далее в теплообменник ТО. Разогретый до необходимой температуры мазут через телескопический гидромонитор вводится внутрь цистерны, где перемешивается с холодным. Циркуляция темных нефтепродуктов осуществляется винтовыми насосами (ВН).

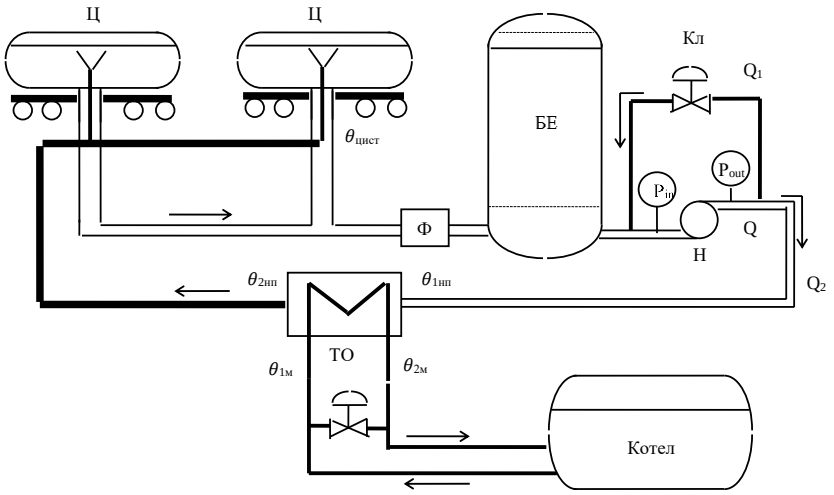


Рисунок 1 – Технологическая схема процесса слива

Циркуляционному разогреву и перемещению нефтепродуктов характерно образование парогазовых пузырьков и последующее их схлопывание в потоке жидкости. Так называемый процесс кавитации сопровождается гидравлическими микроударами высокой частоты и характеризуется большими значениями давления и температуры в центрах схлопывания пузырьков. Возникают шум (треск, удары) и вибрация, происходит интенсивная эрозия поверхностей рабочих органов. Кавитация изменяет технические характеристики насоса, снижает другие показатели, а недопустимые вибрации ВН приводят к преждевременному выходу из строя дорогостоящего оборудования [1] – [3].

В настоящее время отсутствуют специализированные датчики, доставляющие информацию о кавитационных режимах систем перекачки темных нефтепродуктов. Сложности добавляет и то, что технологический процесс перевалки нефтепродуктов – территориально рассредоточенный объект управления. Кавитационные режимы дистанционно регистрируются оператором на основе интегрированного анализа данных от целого ряда датчиков — вибрации, давления на входе и выходе насоса, частоты вращения и тока нагрузки двигателя, температуры перекачиваемого продукта и др.

Кавитация ВН – сложное явление, зависящее от множества факторов [4]. Практика эксплуатации показывает, что набор технологических параметров, включающий вибрацию насоса, температуру перекачиваемого продукта, давление и др., позволяет опытному оператору с достаточной степенью достоверности оценивать техническое состояние насоса [5]. Вместе с тем, анализ данных человеком-оператором носит субъективный характер. Разница в квалификации, невнимательность и усталость могут оказаться причиной задержек в обнаружении неисправностей и принятии мер по их устранению. Актуальна задача автоматизации процедур диагностирования систем перекачки темных нефтепродуктов.

Таким образом, задача состоит в передаче автоматам способности опытных операторов, т. е. в обучении машин распознавать кавитационные режимы в системах перекачки. Возможны ситуации, когда знания операторов удается явно формализовать в виде продукционных правил типа «ЕСЛИ–ТО». В общем случае приходится рассматривать знания операторов как некоторые преобразователи данных и обращаться к моделированию и идентификации.

Диагностические модели кавитационных режимов

Системы диагностирования процессов перекачки основаны на диагностических моделях, оценивающих режимы кавитации по данным от датчиков.

Следует иметь в виду, что кавитация ВН – это не только событие, но также развивающийся во времени и различающийся по интенсивности процесс. Предлагается ввести количественную оценку интенсивности кавитации – интегральный показатель к, который принимает значения на интервале [0,1], причем, к = 1 – режим кавитации; к = 0 – нормальный режим. Таким образом, результатом диагностирования оказывается степень принадлежности к кавитационному режиму работы к. Устройство диагностирования должно не только констатировать факт кавитации, но и следить за процессом его возникновения и развития, что позволит прогнозировать состояние оборудования.

Входом автоматически действующего устройства диагностирования являются переменные, характеризующие состояния ВН и системы слива:

n – частота вращения вала насоса (производительность);

p_{out} – давление на выкиде насоса;

p_{inp} – давление на всасе насоса после фильтра;

p_{ini} – давление перед фильтром;

$\theta_{\text{буф}}$ – температура продукта в буферной емкости;

$\theta_{\text{цист}}$ – температура на выходе из цистерн;

θ_{toout} – температура выходе из теплообменников;

$\theta_{\text{эстout}}$ – температура на выходе из эстакады слива;

v – вибрация насосного агрегата.

Как показывает практика, по мгновенным значениям технологических параметров нельзя диагностировать режим кавитации. Эксперт диагностирует состояние ВН с учетом информации о тенденции изменения показаний датчиков на некотором интервале времени. При этом выбор интервала времени не формализован и вариативен. Функция оператора заключается в том, что «улавливая» режим кавитации, не только диагностировать, но и прогнозировать состояние агрегата, принять решение по своевременному переводу ВН в безопасное состояние.

Количественная оценка интенсивности кавитации достигается обработкой контролируемых данными на определенном отрезке времени. Это, прежде всего, относится к быстро меняющимся показаниям датчика виброскорости

$$v_k \equiv v\left(kT_s\right); k = 1, \ldots, K,$$

где T_S – периодичность контроля (время выборки), K – число отсчетов (измерений) на интервале времени KT_S. Далее принято, что на этом интервале температура и давления перекачиваемого продукта, частота вращения ВН и другие технологические параметры — входы устройства — меняются мало, что позволяет оперировать их усредненными значениями. Также принято, что положение клапана подачи теплоносителя в теплообменник и тип перекачиваемого нефтепродукта (марка мазута) остаются неизменными на интервале оценивания интенсивности кавитации.

Зависимость интенсивности кавитации от контролируемых технологических параметров в общем виде запишется так:

$$\kappa = f\left(\{v_1, \ldots, v_K\}, p_{\text{out}}, p_{\text{inp}}, p_{\text{ini}}, \theta_{\text{буф}}, \theta_{\text{цист}}, \theta_{\text{то}_{\text{out}}}, \theta_{\text{эст}_{\text{out}}}\right) \quad (1)$$

Упрощенная, логическая форма зависимости (1) представляется как база правил на четких и нечетких множествах.

Алгоритм «усредненного оператора»

Одним из способов раскрытия зависимости (1) является обобщение экспертной информации, например, в форме продукционных правил. В [10] предложен явный алгоритм обработки данных для диагностирования кавитационных режимов по данным установленного на корпусе насосного агрегата датчика виброскорости v.

Разработчики устройства диагностирования вместе с операторами («усредненными экспертами») составляют правила вида:

ЕСЛИ <*Число превышений порогового уровня вибрации за диагностируемый интервал времени больше порогового значения*> ТО <*Режим кавитации*>

Алгоритм выявления кавитационного режима складывается из следующей последовательности операций:

1 – формирование массива данных с учетом выбранной глубины;

2 – сравнение текущего значения виброскорости с пороговым;

3 – сдвиг значений в массиве событий на единицу влево;

4 – запись результата сравнения (1 – превышение; 0 – норма) в ячейку массива событий;

5 – подсчет количества превышений порогового значения с учетом длительности сигнала превышения;

6 – время превышения аварийного порога «Кавитация»; иначе – «Вибрация вследствие технического состояния ВН».

Поскольку граница между нормальными и кавитационным режимами размыта, то экспертный/«эмпирический» алгоритм не полностью формализован, что не исключает субъективный фактор.

Для разработки диагностической модели системы слива, т. е. раскрытия зависимости (1), могут быть использованы как аналитический, так и экспериментальный способы. Аналитический способ построения модели вибрационных режимов на основе законов природы, которым

подчиняются процессы кавитации конкретной системы слива, представляется крайне сложной задачей. Экспериментальный способ идентификации процесса диагностирования предполагает наличие достаточного объема представительных данных. В условиях нефтебаз нереализуемы активные эксперименты с нормальными и кавитационными режимами оборудования. Единственной реальной, хотя и весьма трудоемкой, возможностью оказывается пассивная (ретроспективная) идентификация по архивным данным – записям показаний датчиков и решений оператора.

Разработано множество методов и алгоритмов обработки экспериментальных данных, большинство которых связано с принятием гипотезы о структуре зависимости (1). Очевиден подход построения модели (1) в предположении о линейном характере зависимости. Метод наименьших квадратов аппроксимирует данные линейными зависимостями при условии малых отклонений технологических параметров от режима. Метод не вполне пригоден для диагностирования существенных отклонений от нормы, т. е. кавитационных режимов. Особые режимы кавитации относятся к существенным, бифуркационным проявлениям зависимости (1), для описания которых необходимы нелинейные модели. Для обработки данных уместно использовать универсальные аппроксиматоры в виде обучаемых искусственных нейронных сетей.

Применение искусственных нейронных сетей

Выбран подход нелинейной аппроксимации, основанный на идее идентификации методом подстраиваемых параметров, а именно, на применении искусственной нейронной сети (ИНС) для оценки интенсивности кавитации κ (рис. 2).

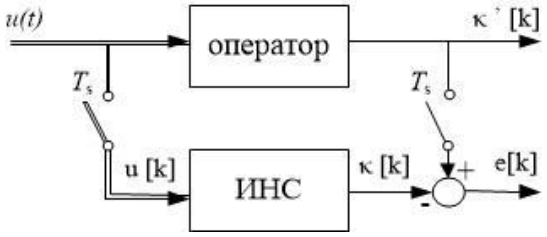


Рисунок 2 – Структура модели обучения и тестирования ИНС

Структура искомой зависимости (1) в этом случае не задается явно, процедура сводится к выбору типа и архитектуры ИНС.

В процессе нейросетевого анализа можно выделить четыре основных этапа: постановка задачи, подготовка данных, нейросетевое моделирование, анализ результатов. На первом этапе необходимо идентифицировать проблему, определить архитектуру и тип ИНС, а так же, установить какой вид будут иметь входные и выходные данные – все эти задачи не имеют однозначного решения и определяются практическим путём.

Для решения задачи диагностирования режимов ВН была выбрана двухслойная ИНС прямого распространения (*feedforward*), состоящая из одного скрытого и одного выходного слоя. Входной слой – это объект со своим признаковым описанием. Первый и второй слои сети состоят из персептронов. Для расчёта применена сигмоидальная функция активации.

Подготовка обучающих последовательностей. Первое необходимое условие для создания модели – качественно подготовленные данные. Чтобы избежать появления ситуации «мусор на входе, мусор на выходе» и повысить качество данных и, как следствие, эффективность модели, необходимо провести мониторинг работоспособности данных, как можно раньше обнаружить проблемы и решить, какие действия по предварительной обработке и очистке данных необходимы. При подготовке обучающих последовательностей необходимо устранить следующие проблемы: неполнота – данные не содержат атрибутов, или в них пропущены значения; шум – данные содержат ошибочные записи или выбросы; несогласованность – данные содержат конфликтующие между собой записи или расхождения.

При работе с данными, полученными с контрольно-измерительных устройств, возникает вопрос о неполноте данных. Это происходит в следствии того, что датчики, регистрирующие параметры системы, имеют разную частоту измерения. Поэтому данные на входе неоднородны, трудно соотносимы по времени. Существуют следующие варианты решения проблемы неполноты данных: удаление записей с пропущенными значениями, замена пропущенных значений фиктивными, замена средними значениями, замена медианными значениями, замена пропущенных значений регрессионными.

Для рассматриваемой задачи, наиболее подходящими являются алгоритмы интерполяции. То есть своего рода аппроксимация, при которой кривая построенной функции проходит точно через имеющиеся точки данных. Необходимым условием считается – выполнение нормализации данных, приведение всех показателей к промежутку [0 1].

Важным фактором для обучения нейронной сети является количество обучающей выборки. Выбор размера обучающей выборки – трудноразрешимая задача, решение которой можно найти при помощи эмпирического исследования.

Количество данных, необходимых для машинного обучения, зависит от многих факторов, таких как: сложность задачи, номинально неизвестная основная функция, наилучшим образом связывающая входные и выходные переменные; сложность обучающего алгоритма, номинально алгоритм, используемый для индуктивного обучения основной неизвестной отображающей функции из конкретных примеров.

Хороший способ приблизительной оценки того, в какой степени полезно иметь больше обучающих образцов, состоит в построении графика производительности нейронной сети на основе размера обучающего набора.

Обучение и тестирование ИНС. В настоящее время нет никаких жестких правил ни для выбора количества скрытых слоев, ни для выбора количества нейронов в них. Хотя существуют ограничения, помогающие принимать решения.

Выбор правильного количества нейронов в скрытых слоях является очень важным. Слишком малое количество – и сеть не сможет обучиться. Слишком большое повлечет за собой увеличение времени обучения сети до фактически нереального значения. Также это может привести к переобученности ИНС, проявляющейся в том, что сеть будет прекрасно работать на обучающей выборке, но очень плохо на входных примерах не входящих в нее.

Тестирование ИНС производится с использованием примеров тестовой выборки, объем которой составлял 400 событий. По результатам тестирования оценивается ошибка работы нейросетевой модели.

Нейросетевая модель реализована на языке Python с применением библиотеки с открытым исходных кодом Keras. Структурная схема работы программы представлена на рис. 3. Выход 2 отображает нечеткую границу между нормальным и кавитационными режимами ВН. То есть показывает степень принадлежности работы к исправным режимам.

Поскольку граница между нормальными и кавитационным режимами размыта, для получения четкой границы, на выходе установлен блок идеального реле. Результаты тестирования работы модели, построенной на базе нейронной сети и на базе алгоритма «усредненного оператора» представлена на рис. 4 – рис. 5.

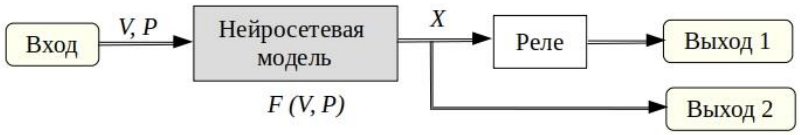


Рисунок 3 – Нейронная сеть, распознающая режим ВН

Рисунок 4 – Результат работы нейросетевого классификатора (Выход 1)

уровень 5 - кавитационный режим ВН, уровень 0 - исправный режим ВН.

Рисунок 5 – График нечеткой границы между нормальным и кавитационными режимами ВН (Выход 2)

Разметка данных. Кластерный анализ

Процесс сбора данных, а именно кодирование режимов работы ВН – сложная, ресурсоёмкая операция, для выполнения которой требуются определённые навыки и опыт. Для первого компьютерного эксперимента считалось, что эксперт на базе имеющегося у него опыта, может точно определять эффективность режима работы *к*.

Использование алгоритмов кластеризации позволяет упростить работу подготовки обучающей выборки для последующего обучения ИНС. В случае определения режима работы насоса, ставится задача разбиения множества объектов на группы (кластеры), т.е. в терминах машинного обучения, эта процедура относиться к задаче кластеризации. Кластерный анализ – это задача разбиения множества объектов на группы, называемыми кластерами, таким образом, чтобы внутри каждой группы оказались «похожие» объекты, а объекты разных групп должны быть как можно более различны. Главное отличие кластеризации от классификации состоит в том, что перечень групп четко не задан и определяется в процессе работы алгоритма.

Наиболее популярным алгоритмом кластеризации данных является метод k-средних. Это итеративный алгоритм кластеризации, основанный на минимизации суммарных квадратичных отклонений точек кластеров от центроидов (средних координат) этих кластеров. На рис. 6 представлен результат работы кластерного анализа для обучающей выборки.

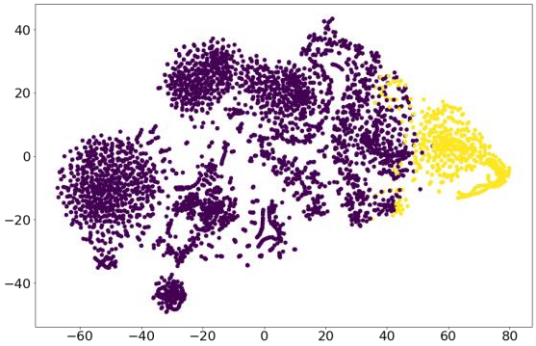


Рисунок 6 – Кластеризация данных методом k-средних (желтый цвет – режим кавитации; фиолетовый – нормальный режим)

При использовании многих алгоритмов кластеризации (как например, метод k-средних) обязательным является задание числа кластеров. В случае диагностирования состояния ВН, выделяется 2 основных класса «нормальный» и «кавитационный». Результаты тестирования работы обученной ИНС при применении кластеризации, а так же сравнение с алгоритмом «усредненного оператора» представлены на рис. 7.

Рисунок 7 – Результат работы нейросетевого алгоритма с применением кластерного анализа для обучающей выборки.

Отметим, что в результате применения кластеризации эффективность применения нейросетевого алгоритма увеличилась.

Заключение

Составленный алгоритм «усредненного оператора», а так же обученная ИНС упростят работу оператора при эксплуатации ВН. При использовании предлагаемых решений, оператор получает своевременную информацию о качестве эксплуатации оборудования в процессе перекачки нефтепродукта. В случае сигнализации о неудовлетворительном режиме, оператор принимает необходимые меры для приведения ВН к нормальному режиму работы. Разработанные решения могут быть применены при создании компьютерного тренажера для обучения новых сотрудников.

В дальнейшем могут быть рассмотрены и другие подходы для определения режима кавитации. Неточности и неопределенности при передаче информации от эксперта к разработчику можно описать, используя аппарат нечеткой логики. А наличие начального набора условий, составленных со слов оператора, может увеличить качество работы ИНС. Поэтому предлагается комбинировать Neuro- и Fuzzy-технологии с целью рационального сочетания: 1 – способности ИНС к обучению на верифицированных данных; 2 – возможности формализации знаний экспертов в виде базы правил механизмов вывода в нечеткой логике. В частности,

использование адаптивной нейро-нечеткой система вывода ANFIS (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрухин, В.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации/ С.В. Петрухин. – М., 2010. – 176 с.

2. Хусаинова, А.Р. Об оценке технического состояния секционных центробежных насосов типа ЦНС [Текст]/ А.Р. Хусаинова, Ф.Ш. Забиров// Аллея науки, 2017. - №9, Т.2. – С.425-428.

3. Харламенко, В. И. Эксплуатация насосов магистральных нефтепродуктопроводов [Текст] / В. И. Харламенко, М. В. Голуб. – М. : Недра, 1978

4. Lu Li, Chenquan Hua, Xuan Xu, Condition monitoring and fault diagnosis of electric submersible pump based on wellhead electrical parameters and production parameters[J], Systems Science & Control Engineering, 2018(3)

5. Хакимьянов М.И. Повышение энергетической эффективности скважинных насосов механизированной добычи нефти // Энергетик. 2016. № 5. С. 36–38.

6. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления: Учебн. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 211 с.

7. Han J., Kamber M., Pei J. Data mining: concepts and techniques. Morgan Kaufmann, 2006. 743 p.

8. Jang, Sun, Mizutani (1997) – Neuro-Fuzzy and Soft Computing – Prentice Hall, Seiten 335–368

9. Шестопалов М.Ю., Имаев Д.Х. Диагностирование систем управления с помощью нейросетевых классификаторов распознавания неисправностей // Сб. докладов XVI Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM-2013, Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 23–25 мая, т. 1, 2013. С. 109–111.

10. Имаев Д.Х., Немудрук М.Л., Федоров М.С., Шестопалов М.Ю. Интеллектуальные системы удаленного диагностирования технического состояния агрегатов// С. 404–417. Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2018). – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 742.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-257-262

Богданова Мария Сергеевна, Ляшенко Александр Леонидович

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Аннотация. *В работе рассматривается процесс проектирования устройства, предназначенного для автоматического регулирования температуры. В процессе проектирования были разработаны функциональная и структурные схемы устройства, на основе которых была разработана принципиальная электрическая схема. Рассмотрен процесс создания микросборки. Проведены конструкторские расчеты, включающие расчет параметров печатной платы, расчет надежности, тепловой расчет и расчет резонансной частоты.*

Ключевые слова: *система управления, контроль, диагностика, управление, проектирование, микросхема, микросборка, трассировка, печатная плата.*

Annotation. *The paper discusses the design process of a device designed for automatic temperature control. In the design process, functional and block diagrams of the device were developed, on the basis of which a circuit diagram was developed. The process of creating a microassembly is considered. Design calculations were carried out, including the calculation of the parameters of the printed circuit board, the calculation of the reliability, the thermal calculation and the calculation of the resonant frequency***.**

Keywords*: control system, control, diagnostics, control, design, microcircuit, microassembly, tracing, printed circuit board.*

Введение

В настоящее время на рынке появляются относительно недорогие системы регулирования климатических параметров, позволяющие создавать сравнительно простые, и при этом обладающие неплохими качественными показателями, конструкции, способные с большой точностью контролировать и поддерживать климатические условия, например, в оранжерее.

Цель работы заключается в выполнении схемотехнической и конструкторско-технологической разработке изделия, предназначенного для регулирования и поддержания температуры в нужной для его применения области и обеспечивающего высокий уровень безотказности, позволяющей получить более высокие значения показателя эффективности.

Постановка задачи

В оранжерее для каждого вида растений требуются определенные климатические условия, для каждого вида поддержание определенных климатических параметров очень сложно, в зависимости от временных факторов (время суток, время года).

Применение электронных микросхем позволит создать довольно простое устройство, способное регулировать температуру в широком интервале значений и поддерживать её с высокой точностью.

В связи с этим требуется решить ряд задач, одной из которых является обеспечение качества процесса изготовления устройства с применением современных технологий при рациональной себестоимости. Для достижения данной цели следует разработать такой технологический процесс, который являлся бы наиболее эффективным. Кроме того следует выбрать оснащение, определить операции требующие автоматизации, в зависимости от объема производства изделий выбрать организационно-технологическую форму технологического

участка или комплекса, выполнить расчеты его характеристик и решить задачи обеспечения технологичности собираемой конструкции, экономичности, безопасности и экологичности процессов в технологическую систему сборки.

Разработка принципиальной схемы

Одним из видов моделирования, используемых при исследовании сложных объектов, включая процессы проектирования и технологической подготовки изготовления изделий, является структурно-функциональное моделирование. Основное назначение структурно-функционального моделирования состоит в формировании и анализе функциональных требований, предъявляемых к разрабатываемым объектам системам и процессам различной природы [1].

Разрабатываемая система состоит из таких элементов как: задающее устройство, элемент равнения, усилитель, регулятор, устройство сопряжения с объектом, исполнительный механизм, операционный усилитель, датчик (Рис. 1)

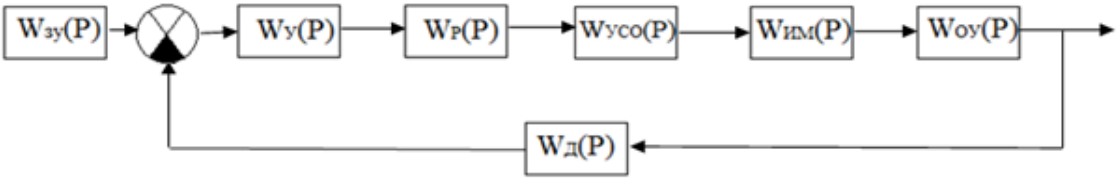


Рисунок 1 – Структурно схема системы

Задающее устройство формирует алгоритм работы системы, его выходной сигнал подается на элемент сравнения. На выходе элемента сравнения формируется сигнал ошибки, который поступает на вход усилителя. Сигнал усиливается и подается на ПИ-регулятор, далее сигнал поступает на устройства сопряжением объектом, где идет вывод сигнала на исполнительный механизм. И завершается это всё объектом управления, где требуется установить нужную температуру. На объекте управления установлен датчик, сигнал, с выхода которого подаётся на вход элемента сравнения.

На основании разработанного выше составим принципиальную схему, представленную на рисунке 2.

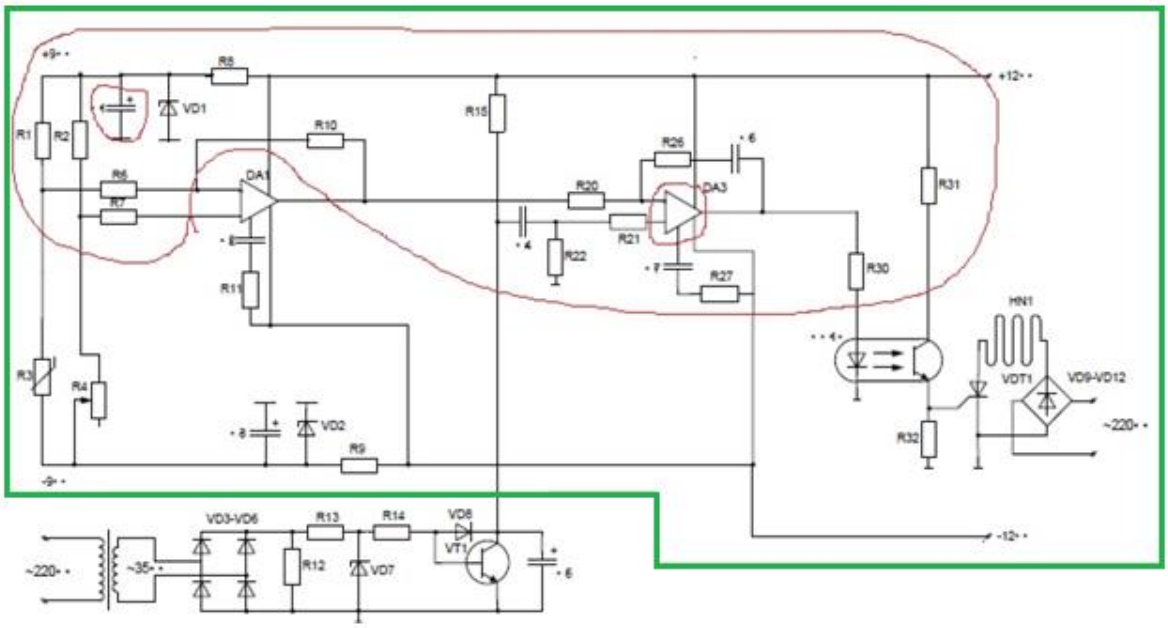


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы

В принципиальной схеме использовала регулятор пропорционально-интегрирующий или ПИ- регулятор. Датчиком температуры является термистор R3, входящий в мостовую схему, которая состоит также из переменного резистора R4, резисторов R1 и R2. На выходе мостовой

схемы формируется сигнал рассогласования, которой поступает на вход усилителя. Усиленный сигнал ошибки подается на вход усилителя DA2. В усилители происходит изменение сигнала до уровня достаточного для срабатывания регулятора DA3. На выходе регулятора получаем управляющее воздействие на устройства сопряжением с объектом ОП1. После ОП1 сигнал подается на исполнительный механизм VDT1.

Часть схемы, выделенной прямыми зелеными линиями, предлагается выделить в отдельную микросборку, а обведенную на схеме красной кривой часть, предлагается выделить в отдельную микросхему [2].

На рисунке 3 представлена принципиальная электрическая схема разрабатываемой микросхемы.

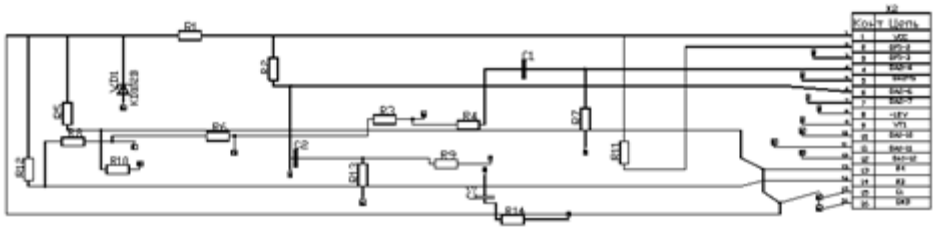


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема микросхемы

С учетом сделанного составим схему микросборки [3] (Рис. 4).

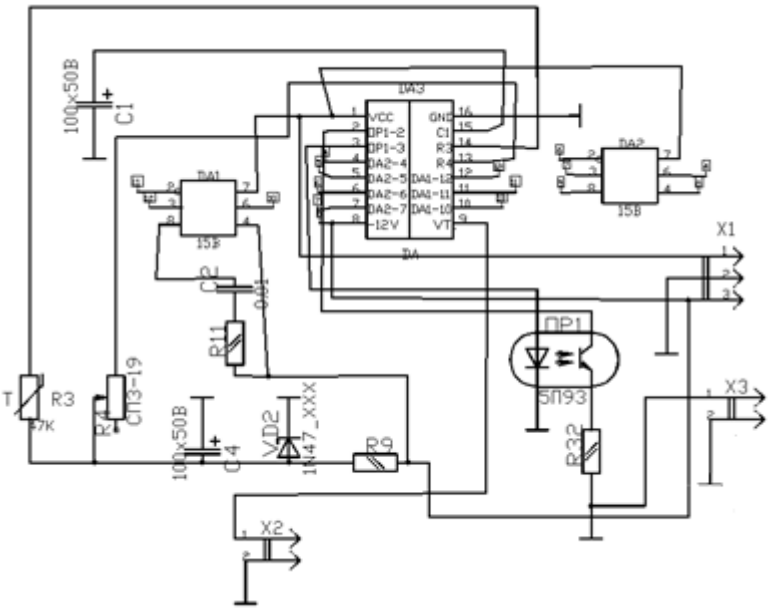


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема микросборки

Разработка принципиальной печатной платы

Далее приступим к разработке печатной платы и несущей конструкции. В качестве основного материала для изготовления несущей конструкции разрабатываемого блока был выбран сплав Д16.Б.30 ГОСТ 17232-79.Этот сплав обладает высокими механическими свойствами. В воздухе на поверхности алюминия образуется оксидная пленка (Al_2O_3), которая практически не разрушается в атмосфере, воде и окислительных средах. Однако толщина пленки очень невелика, а ее защитная способность значительно ослаблена из-за наличия легирующих компонентов. Поэтому алюминий и его сплавы обычно подвергают искусственному оксидированию, создают пленку большей толщины [4].

В качестве материала для монтажного основания модулей был выбран двухсторонний фольгированный стеклотекстолит марки СФ-2-35-1.5 ГОСТ 1316-78. Данный материал

представляет собой слоистый прессованный материал, с двух сторон покрытый медной электролитической гальваностойкой фольгой толщиной 18 мкм. Толщина фольги определяется в данном случае уровнем токов, проходящих по проводникам с шириной, соответствующей выбранному классу точности. Предельно-допустимая рабочая температура материала от -60 до +105 °С.

При монтаже применяется припой ПОС-61, который обладает необходимыми прочностными характеристиками и приемлемой температурой плавления. В качестве флюсов используется химически неактивный флюс – раствор канифоли.

Для проведения компоновки печатного узла рассчитали установочные площади радиоэлементов, при этом необходимо учитывать отформованные выводы.

Трассировку печатной платы и размещение элементов на ней определяем с использованием системы автоматизированного проектирования P-CAD [4] на основании разработанной электрической принципиальной схемы. Трассировка ПП показана на рисунке 5.

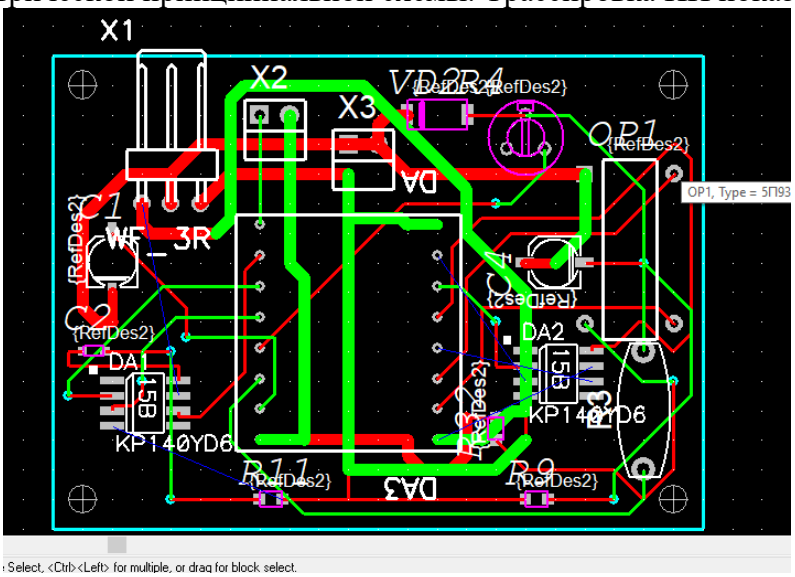


Рисунок 5 – Трассировка печатной платы

На рисунке 6 представлен Сборочный чертеж платы.

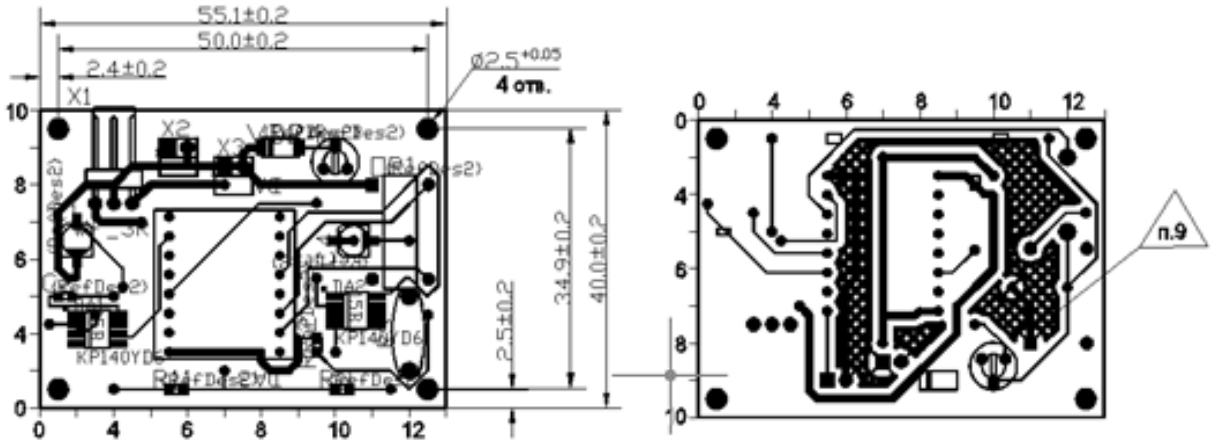


Рисунок 6 – Сборочный чертеж платы

Далее был произведен рад конструкторских расчетов [2].

Конструкторские расчеты

Расчет надежности. Одним из показателей надежности является среднее время наработки до отказа $T_{ср}$ =1/Λ_Σ , (ч). Где Λ_Σ - интенсивность отказов системы, которая рассчитывается по выражению: $\Lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$, (1/ч).

Расчеты показали, что среднее время наработки до отказа $T_{ср}$ = 123122 часа.

Тепловой расчет. Целью расчета является определение температур нагретой зоны и среды вблизи поверхности радиоэлементов, необходимых для оценки надежности [5].

Произведем расчет стационарного теплового режима блока при естественном конвективном теплообмене. Конструкция ЭА заменяется ее физической тепловой моделью, в которой нагретая зона представляется в виде параллелепипеда, имеющего среднеповерхностную температуру $t_{н.з}$ и рассеиваемую тепловую мощность $P_{н.з.}$

На рис. 7 представлена тепловая модель блока.

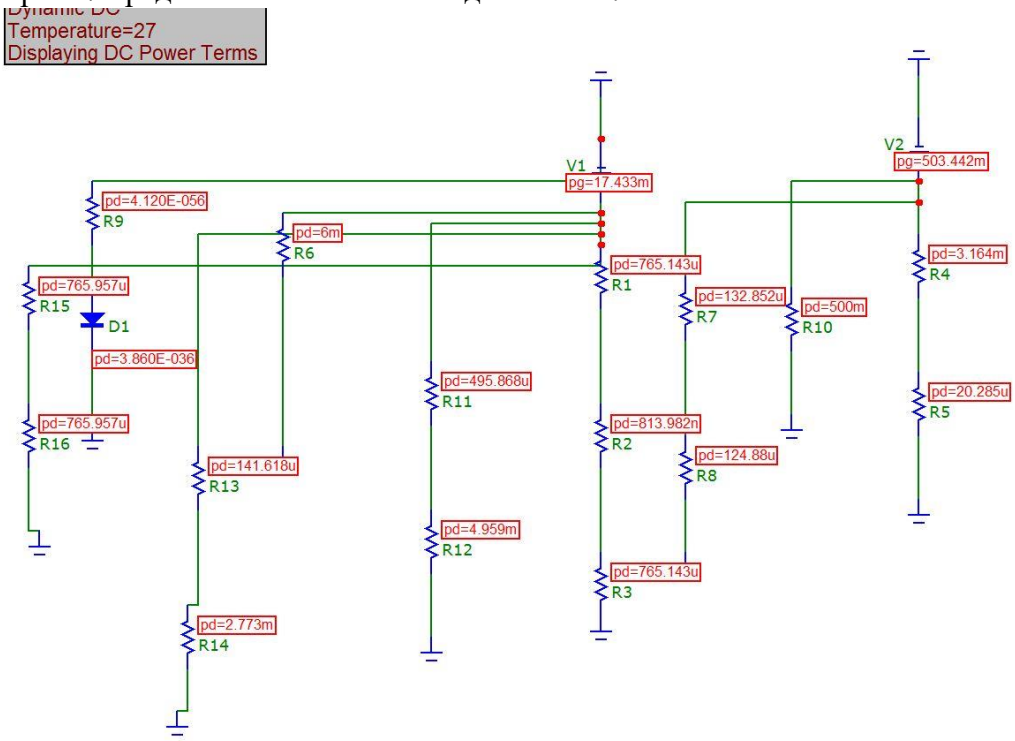


Рисунок 7 – Тепловая модель в Micro – CAP 9

За размеры нагретой зоны принимаются размеры шасси l_1 и l_2 и высота l_3, которая определяется по формуле $l_3 = \delta_ш + h_{з1} + h_{з2}$, где $\delta_ш$— толщина шасси; $h_{з1}$и $h_{з2}$ — части высоты нагретой зоны, расположенные со стороны шасси в 1-м и 2-м отсеках, на которые шасси делит блок радиоаппаратуры.

Расчет резонансной частоты печатного узла. Частота собственных колебаний печатных узлов на печатных платах определяется как частота собственных колебаний равномерно нагруженной пластины. В нашем случае пластина закреплена в 4х точках и частота может быть посчитана по формуле:

$$f_0 = \frac{\pi}{2a^2}\left(1+\frac{a^2}{b^2}\right)\sqrt{\frac{D}{M}ab} = 0,58кГц$$

Где a,b – размеры сторон платы, M - масса платы с ЭРЭ, D- цилиндрическая жесткость.

По техническому условию вибрации возникают в диапазоне от 10 до 80 Гц. Этот диапазон частот не пересекается с собственной частотой колебаний и резонанс при эксплуатации возникать не будет. Дополнительные меры по амортизации изделия не требуются.

Заключение

В ходе работы успешно решена задача разработки устройства автоматического регулирования температуры в оранжерее. Основной целью проделанной работы было уменьшить габариты и улучшить технические качества данного устройства. Устройство полностью соответствует требованиям технического задания. В ходе работы была разработана конструкция нашего устройства и технология его изготовления.

Разработаны схемы размещения компонентов и трассировка печатной платы, произведены поверочные расчеты компоновки, конструкторский расчет элементов печатных плат, расчет собственных частот колебаний печатной платы с элементами, тепловой расчет, расчет показателя надежности, как среднее время наработки на отказ. Обоснован выбор материалов печатных плат и защитных покрытий.

Применение САПР (P-CAD, Micro Cap, Auto Cad), в процессе проектирования, позволило значительно сократить количество затраченного времени на такие операции как разводка печатной платы, обеспечения и контроля соблюдения необходимых технологических норм, проектирование конструкции, разработка конструкторской документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карташов Б.А. Компьютерные технологии и микропроцессорные средства в автоматическом управлении/ Б.А. Карташов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. –540с.
2. Абдуазизов А.А. Проектирование, технология радиоэлектронных средств / Абдуазизов А.А. ,Маненков В.И., Собирова У.Ш. - ТУИТ, 2003. – 152 с.
3. Смирнов О.Л. Проектирование микросборок в среде P-CAD, MC, EXCEL, СпбГУАП, 2017. – 152 с.
4. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учеб.
5. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, – 560с. Высшее образование, 2005.
6. Дульнев Г.Н.. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Высшая школа, 2006 – 248 с..

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-263-273

Светлов Михаил Семенович

Институт проблем точной механики и управления РАН

ТЕОРИЯ КОДИРОВАНИЯ: КЛАССИКА И МОДЕРН

Аннотация. *Работа посвящена рассмотрению состояния современной теории кодирования (ТК), проблемам и задачам, решаемым при синтезе цифровых информационных каналов (ИК) и систем передачи информации (ЦСПИ) с целью обеспечения требуемого уровня информационной надежности в условиях действия помех большой интенсивности. Предложена метрика геометрической модели недвоичных кодов, принципиально отличающаяся от принятой в классической ТК. Это позволило синтезировать более качественные математические модели недвоичных ИК, а также существенно расширить классификацию корректирующих кодов. В целом получены результаты, использование которых на практике позволит синтезировать ИК и ЦСПИ повышенной информационной надежности.*

Ключевые слова: *теория кодирования, корректирующие коды, помехоустойчивость, геометрическая модель кода, математическая модель недвоичного канала.*

Annotation. *The work is devoted to the state of the modern coding theory (TC), problems and tasks solved in the synthesis of digital information channels (IC) and information transmission systems (DITS) in order to ensure the required level of information reliability in the conditions of high-intensity interference (noise). The metric of the geometric model of non-binary codes, fundamentally different from the classical TC, is proposed. This made it possible to synthesize higher-quality mathematical models of non-binary IC, as well as significantly expand the classification of corrective codes. In general, the results obtained, the use of which in practice will synthesize IC and DITS increased information reliability.*

Keywords: *coding theory, correcting codes, noise immunity, geometric code model, mathematical model of non-binary channel.*

Введение

Быстрый рост обработки данных, развитие систем цифрового вещания и компьютерных сетей предъявляют высокие требования к минимизации ошибок используемой дискретной информации. Переход всех форм создания, хранения, использования и передачи данных на цифровые методы еще больше повышает важность качественной обработки информационных потоков, в первую очередь с точки зрения надежной и достоверной передачи информации [1, 2].

Важнейший вклад в решение задач обеспечения информационной надежности вносит теория помехоустойчивого кодирования. На ее базе разработаны все новые методы защиты от ошибок, основанные на использовании корректирующих кодов (КК). Именно благодаря использованию КК в цифровых системах передачи информации (ЦСПИ) любого функционального назначения обеспечиваются их высокие скоростные и дистанционные характеристики при повышенных требованиях по помехоустойчивости в условиях действия канальных помех большой интенсивности и относительно малом отношении сигнал/шум. Использование современных методов кодирования — мощный способ многократного повышения эффективности дорогих спутниковых и других цифровых информационных каналов (ИК) [3–6].

Основные проблемы теории кодирования

Теория кодирования (ТК) — важнейший раздел теории информации (ТИ). Исторически задачи обеспечения секретного и надежного информационного обмена с использованием

кодовых методов обработки информации были определяющими при разработке и внедрении систем связи. Традиционно, в определенном смысле, всегда сохранялась преемственность задач кодирования и методов их решения [7].

ТК, вызванная к жизни, прежде всего, актуальными проблемами систем связи и обусловленная требованиями к ней именно с их стороны, тем не менее, теоретически, а точнее, математически, как наука сложилась в рамках ТИ. Поэтому, несмотря на достаточную стройность и независимость в научном плане, ТК не может рассматриваться в отрыве от общих проблем и задач ТИ [8].

Таким образом, вопрос о том, какие коды, методы, алгоритмы кодирования являются лучшими с точки зрения обеспечения информационной надежности, не вполне корректен, и сама постановка задачи синтеза лучших кодов, методов и алгоритмов кодирования в целом не предполагает возможности ее решения в отрыве от других проблем ТИ [9]. Корректное решение вопросов применимости определенных кодов и принципов кодирования возможно лишь при наличии априорной, хотя бы некоторой, информации об объеме передаваемых сообщений, требованиях к надежности их передачи и оценке, желаемой скорости передачи, типе каналов связи (КС), их статистике, виде используемых сигналов и методах модуляции, энергетических потребностях и т.д.

Рассмотрим основные проблемы ТК применительно к ЦСПИ.

В соответствии с типовой структурой ЦСПИ [10] кодер источника информации формирует цифровой сигнал, в большинстве случаев — бинарный (двоичный), который затем в любом выбранном алфавите представляется в виде, как правило, стандартизированного первичного кода (ПК) (часто с предварительным сжатием (компрессированием) сигнала). При синтезе (выборе) ПК решаются задачи обеспечения требуемых показателей точности, разрешающей способности, оптимизации по предварительно выбранным критериям и некоторые другие. Главной особенностью ПК является их непомехоустойчивость или низкая помехоустойчивость, поэтому они не приспособлены для их непосредственной передачи по КС с помехами.

С целью формирования в КС сигналов, способных противостоять помехам и канальным искажениям различного вида, то есть обладающих свойством парирования помех (в широком смысле), математической основой канальных сигналов (их математической моделью) должны быть КК. В ТК к КК относят любые помехоустойчивые коды: обнаруживающие, исправляющие, обнаруживающие и исправляющие ошибки.

Задача формирования КК решается в кодере канала. С точки зрения обеспечения требуемых показателей по достоверности передачи информации именно кодер канала отвечает за решение этой задачи. Характерно, что при кодировании информации в нем (вторичное кодирование) и формировании всегда помехоустойчивого вторичного кода (ВК) осуществляется выбор канального алфавита кодирования, который может отличаться от алфавита кодирования в кодере источника.

Основная тяжесть решения задач достоверного приема информации лежит на декодере канала (ДК). Вообще говоря, ДК — наиболее сложный и ответственный блок всего приемо-передающего тракта системы. Львиная доля работ в ТК посвящена именно решению задач синтеза алгоритмов и способов реализации процедур декодирования КК, включая режимы исправления различных видов ошибок, вызываемых действующими в КС помехами.

Анализ ТК и ее достижений на разных этапах истории развития позволяет сделать вывод об идентичности проблем и задач, которые ставились и решались в разное время практически всеми известными специалистами в области ТИ и ТК, задачам сегодняшнего дня, проблемам современной ТК.

В этом смысле, могут быть сформулированы следующие основные проблемы ТК:

- обеспечение требуемого уровня информационной надежности;
- обеспечение максимально возможной пропускной способности каналов;

– обеспечение требуемой информационной емкости;
– обеспечение заданной скорости передачи;
– обеспечение заданных показателей качества (точности) управления (измерения);
– обеспечение максимального уровня информационной безопасности и скрытности передачи информации;
– обеспечение экономичного использования КС.

Тема работы не предполагает подробного рассмотрения методологии решения указанных проблем и способов их практической реализации. Вместе с тем, анализ этих проблем показывает, что они принципиально противоречивы и не могут быть максимально удовлетворены одновременно при их рассмотрении. Для множественных сложных задач по каждой проблеме должны быть разработаны критерии, отражающие цели и качество их решения. Поэтому ни одна из проблем не предполагает ее абсолютного разрешения — только в смысле принятого критерия. Причем, эти критерии часто сами по себе противоречивы, что существенно усложняет синтез принципов, методов и алгоритмов, а также способов их реализации по каждой проблеме.

Классификация кодов

Рассмотрим более подробно некоторые задачи, решаемые в современной ТК. Основной задачей ТК, безусловно, является задача синтеза КК. Приведем сначала краткую классификацию кодов.

По виду математической модели коды могут быть непрерывными и блоковыми. Особенность блоковых кодов состоит в том, что их кодовые слова имеют фиксированную длину (фиксированное число разрядов). В отличие от блоковых кодов, непрерывные коды представляют собой полубесконечные кодовые последовательности без разбиения их на кодовые слова фиксированной длины.

По виду используемого алфавита в качестве основных различают двоичные и K-ичные коды (K-коды, $K > 2$). В свою очередь, K-коды бывают натуральными (нормальными), использующими для формирования кодовых слов все K символов алфавита (0, 1, 2, ..., K–1, то тесть множество символов $\{0, K_т\}$, где $K_т = \{1, 2, ... , K–1\}$ — токовые (ненулевые) символы алфавита), и кодами без использования нулевого сигнального признака ($K_т$-коды), рабочий алфавит которых содержит только символы $K_т$ (символ 0 не используется).

По свойству помехоустойчивости коды делятся на непомехоустойчивые и помехоустойчивые. К непомехоустойчивым относят коды, не способные противостоять действию помех в КС, то есть коды, не обнаруживающие и, тем более, не исправляющие ошибки. Среди этой группы кодов наиболее значимы так называемые статистические коды, являющиеся кодами, оптимальными по длине. Наиболее применимыми из них являются коды Хаффмана, Шеннона-Фано, арифметический код. Эти коды в большинстве систем лежат в основе процедур компрессирования информации.

Помехоустойчивые (корректирующие) коды способны парировать канальные помехи и, в свою очередь, традиционно делятся на коды:

– обнаруживающие ошибки трансформации, то есть ошибки, при которых одни символы рабочего алфавита под воздействием помех переходят (трансформируются) в другие рабочие алфавитные символы, — коды, обнаруживающие r-кратные ошибки;

– коды, исправляющие ошибки трансформации, или коды, исправляющие все возникающие s-кратные ошибки $(s = r)$;

– коды, обнаруживающие и исправляющие ошибки трансформации, то есть коды, обнаруживающие r-кратные и исправляющие s-кратные ошибки $(s < r)$;

– коды, исправляющие ошибки стирания, то есть ошибки, при которых не происходит трансформации рабочих символов алфавита друг в друга, а стираются различия между ними, и

на выходе канала появляются символы, не принадлежащие рабочему алфавиту, — коды, исправляющие *e*-кратные ошибки.

Следует заметить, что главным свойством КК является их избыточность, то есть длина *n* этих кодов избыточна с точки зрения их информационной емкости, определяющейся числом *m* информационных разрядов кодовых слов, кроме которых в кодовых словах имеется *k* контрольных (избыточных) разрядов:

$$n = m + k. \quad (1)$$

Избыточность кода принято характеризовать коэффициентом R избыточности:

$$R = k / n = (n – m) / n = 1 – m / n, \quad (2)$$

где m / n представляет собой скорость кода (точнее, кодирования).

В ТК доказано, что корректирующие свойства кода повышаются с увеличением значений коэффициента *R* избыточности, которые теоретически лежат в диапазоне от 0 до 1. Однако с практической точки зрения интерес представляют лишь коды, для которых $0 < R < 1$.

Наряду с коэффициентом избыточности корректирующие свойства кода определяются его метрикой, вводимой на основе геометрической интерпретации кодового множества (геометрической модели кода — ГМК) в некотором координатном пространстве, наиболее часто декартовом. ГМК позволяют оценивать помехоустойчивость кодов по значению d_{min} так называемого минимального кодового расстояния (МКР). Наиболее употребительны метрики Хемминга, Ли, Юргенсона.

По определению:

$d_{min} = \min \{d_{ij}\}$,

где *i, j* — номера кодовых слов в рассматриваемом кодовом множестве с информационной емкостью $M (i, j = 1, 2, \dots , M; i \neq j)$.

При этом справедливы соотношения, связывающие значения МКР со значениями кратностей обнаруживаемых и/или исправляемых ошибок различного типа:

$$\begin{gathered} d_{min} \geq r+1; \\ d_{min} \geq 2s +1; \\ d_{min} \geq r+ s +1 \ (s < r); \\ d_{min} \geq r+ s + e +1 \ (s \leq r). \end{gathered} \quad (4)$$

Следует отметить, что классические варианты кодовых метрик, практически совпадающие для двоичных кодовых алфавитов, не позволяют адекватно оценить помехоустойчивость в случае *K*-кодов.

Действительно, классическая ТК традиционно использует следующий вариант ГМК (по Хеммингу):

K — кодовый алфавит множества рабочих кодовых слов *M*; $K = \{0, K_T\}$;

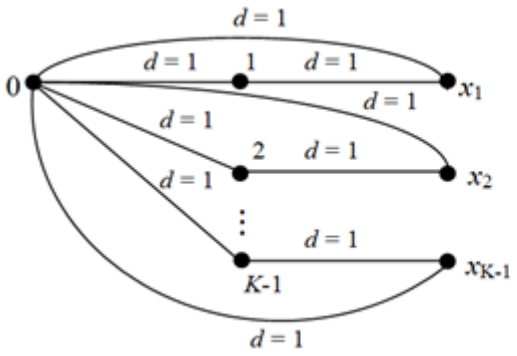
$K_T = \{a_i\}, a_i = i \in \{1, 2, \dots, K–1\};$

$$\begin{gathered} d (0, 0) = d (a_i, a_i) = d (a_j, a_j) = 0; \qquad i, j \in M; i \neq j; \\ d (0, a_i) = d (a_i, 0) = d (a_i, a_j) = d (a_j, a_i) = \\ = d (a_i, x_i) = d (x_i, a_i) = d (a_j, x_j) = d (x_j, a_j) = 1, \end{gathered} \quad (5)$$

где x_i и x_j —символы стирания соответствующих ненулевых алфавитных символов $a_i = i$ и $a_j = j$ ($i \neq j$).

Другими словами, считается, что любое преобразование передаваемого по КС кодового символа в другой алфавитный символ или в символ стирания — следствие воздействия однократной помехи. Это обстоятельство существенно снижает потенциальные корректирующие свойства *K*-кодов.

Рис. 1 иллюстрирует вариант новой введенной в рассмотрение кодовой метрики *K*-кода. Как показал сравнительный анализ различных вариантов метрик, предложенная метрика ГМК существенно выигрывает с точки зрения более адекватной оценки потенциальных возможностей КК по его помехоустойчивости.



$$\begin{cases} d_{0i} = d_{i0} = 1; \\ d_{ij} = d_{ji} = 2; \end{cases}$$
$$j, i = \overline{1, K-1}, \quad i \neq j.$$

Рис. 1. Вариант новой геометрической модели *K*-кода

Анализ математических моделей ЦСПИ различного функционального назначения и сложных ИК приводит к выводу, что традиционная классификация КК по их корректирующей способности является достаточно общей и далеко не в полной мере характеризует возможности обеспечения требуемого уровня информационной надежности, особенно в условиях действия помех большой интенсивности.

С учетом этого предложен вариант новой классификации КК, на основе которого разработаны соответствующие принципы синтеза кодов и методы их кодирования и декодирования.

1. Коды, обнаруживающие ошибки:
   1.1. Коды, обнаруживающие *r*-кратные ошибки трансформации:
   $$d_{min} \geq r+1 \ (1 \leq r \leq n-1); \quad (6)$$
   1.2. Коды, обнаруживающие e_{pf} -кратные ошибки стирания:
   $$d_{min} \geq 1 \ (1 \leq e_{pf} \leq n); \quad (7)$$
   1.3. Коды, обнаруживающие *r*-кратные и e_{pf} -кратные ошибки, соответственно, трансформации и стирания:
   $$d_{min} \geq r + 1 \ (1 \leq r \leq n-1; \ r+1 \leq e_{pf} \leq n). \quad (8)$$
2. Коды, исправляющие ошибки:
   2.1. Коды, исправляющие *s*-кратные ошибки трансформации:
   $$d_{min} \geq 2s+1 \ (s = r \leq \lfloor (n-1)/2 \rfloor); \quad (9)$$
   2.2. Коды, исправляющие e_{cr} -кратные ошибки стирания:
   $$d_{min} \geq e_{cr}+1 \ (1 \leq e_{cr} \leq n-1); \quad (10)$$
   2.3. Коды, исправляющие *s*-кратные и e_{cr}-кратные ошибки, соответственно, трансформации и стирания:
   $$d_{min} \geq 2s + e_{cr} + 1 \ (2 \leq s + e_{cr} \leq n-2). \quad (11)$$
3. Коды, обнаруживающие и исправляющие ошибки:
   3.1. Коды, обнаруживающие *r*-кратные и исправляющие *s*-кратные ошибки трансформации:
   $$d_{min} \geq r + s + 1 \ (3 \leq r + s \leq n-1; \ s < r); \quad (12)$$
   3.2. Коды, обнаруживающие e_{pf}-кратные и исправляющие e_{cr}-кратные ошибки стирания:
   $$d_{min} \geq e_{cr} + 1 \ (1 \leq e_{cr} \leq n-1; \ e_{cr} + 1 \leq e_{pf} \leq n); \quad (13)$$
   3.3. Коды, обнаруживающие *r*-кратные ошибки трансформации и исправляющие e_{cr}-кратные ошибки стирания:
   $$d_{min} \geq r + e_{cr} + 1 \ (2 \leq r + e_{cr} \leq n-1); \quad (14)$$
   3.4. Коды, обнаруживающие *r*-кратные и e_{pf}-кратные ошибки, соответственно, трансформации и стирания и исправляющие *s*-кратные ошибки трансформации:
   $$d_{min} \geq r + s + 1 \ (3 \leq r + s \leq n-1; \ s < r; \ 1 \leq e_{pf} \leq n); \quad (15)$$

3.5. Коды, обнаруживающие *r*-кратные и e_{pf}-кратные ошибки, соответственно, трансформации и стирания и исправляющие e_{cr}-кратные ошибки стирания:

$$d_{min} \geq r + e_{cr} + 1 \ (2 \leq r + e_{cr} \leq n-1;\ r + e_{cr} + 1 \leq e_{pf} \leq n); \quad (16)$$

3.6. Коды, обнаруживающие *r*-кратные и исправляющие *s*-кратные и e_{cr}-кратные ошибки, соответственно, трансформации и стирания:

$$d_{min} \geq r + s + e_{cr} + 1 \ (4 \leq r + s + e_{cr} \leq n-1;\ s < r); \quad (17)$$

3.7. Коды, обнаруживающие *r*-кратные и e_{pf}-кратные и исправляющие *s*-кратные и e_{cr}-кратные ошибки, соответственно, трансформации и стирания:

$$d_{min} \geq r + s + e_{cr} + 1 \ (4 \leq r + s + e_{cr} \leq n-1;\ s < r;\ r + s + e_{cr} + 1 \leq e_{pf} \leq n); \quad (18)$$

1.8. Коды, обнаруживающие e_{pf}-кратные ошибки стирания и исправляющие *s*-кратные ошибки трансформации:

$$d_{min} \geq 2s + 1 \ (s \leq \lfloor (n-1)/2 \rfloor;\ 1 \leq e_{pf} \leq n); \quad (19)$$

3.9. Коды, обнаруживающие e_{pf}-кратные ошибки стирания и исправляющие *s*-кратные и e_{cr}-кратные ошибки, соответственно, трансформации и стирания:

$$d_{min} \geq 2s + e_{cr} + 1 \ (2 \leq s + e_{cr} \leq n-2;\ s + e_{cr} + 1 \leq e_{pf} \leq n). \quad (20)$$

Формулы (6)–(20) позволяют определить требуемое значение МКР при синтезе КК в зависимости от кратности помех, вызывающих ошибки определенного типа. В то же время они отображают условия взаимосвязи кратностей ошибок различных типов.

Продолжая классификацию кодов [18–20] (разделимые и неразделимые, систематические и несистематические, одномерные и многомерные, комбинаторные, арифметические, геометрические, алгебраические и т.д.), отметим, что наиболее важными являются алгебраические коды, синтезированные на основе теории высшей алгебры. Практически все современные ЦСПИ используют алгебраические коды. Среди этих кодов наиболее распространенными являются так называемые групповые коды, синтезированные на основе теории групп [20, 21]. Групповые коды часто интерпретируются как линейные коды, которые представляют собой наборы векторов линейного пространства над двоичными (линейные двоичные коды) или *K*-ичными (линейные *K*-коды) полями Галуа. Высшим классом линейных кодов являются циклические коды — циклические простые коды ($d_{min} \leq 4$) и коды БЧХ (Боуза-Чоудхури-Хоквингема) с $d_{min} \geq 5$. В современных высококачественных и ответственных ЦСПИ широко используются коды БЧХ (Рида-Соломона, Рида-Маллера, Галлагера, Файра и др.) [22].

Проблема синтеза КК

Даже краткий анализ классификации кодов позволяет утверждать, что одной из главных и, возможно, и самой главной задачей ТК является задача синтеза КК. Эта задача имеет три варианта формулировки [1, 4, 5, 21]:

1. По известным значениям длины *n* кода и d_{min} МКР (кратностей *r*, *s* и *e* обнаруживаемых и/или исправляемых ошибок различных типов) необходимо синтезировать код максимальной информационной емкости M_{max} (с максимальным числом информационных элементов m_{max}) — синтез кода, оптимального по информационной емкости.

2. По известным значениям *M* информационной емкости (числа *m* информационных элементов) и длины *n* кода необходимо синтезировать код с максимальным значением $(d_{min})_{max}$ МКР (максимальной суммой кратностей *r*, *s* и *e* обнаруживаемых и/или исправляемых ошибок различных типов), то есть код максимальной помехоустойчивости (корректирующей способности) — синтез кода, оптимального по помехоустойчивости.

3. По известным значениям *M* информационной емкости (числа *m* информационных элементов) и d_{min} МКР (кратностей *r*, *s* и *e* обнаруживаемых и/или исправляемых ошибок различных типов) необходимо синтезировать код минимальной длины n_{min} (с минимальным значением числа k_{min} контрольных (избыточных) элементов), то есть код минимальной избыточности — синтез кода, оптимального по длине.

Анализ различных задач синтеза КК позволяет сделать вывод о том, что наиболее важной является задача в ее третьей формулировке. Синтезированный таким образом КК позволяет, при прочих равных условиях, реализовать ЦСПИ с максимальной пропускной способностью КС.

В современных ЦСПИ наиболее широко используются алгоритмы каскадного кодирования [21–24]. При этом информация последовательно кодируется несколькими различными КК, что позволяет строить ЦСПИ с высокими показателями информационной надежности.

Среди относительно новых разработок в ТК можно отметить синтез алгоритмов кодирования и декодирования с использованием турбо-кодов, ранговых кодов, кодов на основе чисел Фибоначчи, кодов на основе кодовых колец и графов кодовых пересечений и некоторых других кодов.

Следует также упомянуть о применении так называемых разреженных процедур дискретизации, результаты которых весьма обнадеживают, но требуют дальнейших углубленных теоретических исследований.

Проблемы моделирования ИК

Особое место в современной ТК занимают задачи моделирования КС. Однако более перспективным является моделирование не просто КС, а ИК комбинационного типа (без памяти или последействия) и ИК с памятью для разных алфавитов каналов и типов ошибок в них. Наибольший интерес представляет проблема синтеза моделей различных КС и ИК с новыми введенными метриками ГМК.

Такие модели существенно отличаются от известных классических моделей ИК и позволяют синтезировать более качественные алгоритмы кодирования-декодирования с последующей оценкой достоверности передачи.

Как показал анализ, эти модели могут быть математической основой реализации ИК повышенной достоверности [4, 5, 25].

В классической ТК математическая модель бинарного КС с ошибками трансформации имеет вид:

$$q_i + p_{ij} = 1 \ (i, j \in \{0, 1\}, i \neq j), \qquad (21)$$

где q_i, — вероятность правильного приема символа i, а p_{ij} — вероятность трансформации символа i в символ j.

В общем случае значения всех вероятностей в (21) различны. В частном случае симметричных каналов $p_{ij} = p_{ji} = p_0$, (p_0 — вероятность однократной ошибки в КС), следовательно, $q_i = q_j = q$ (q — вероятность правильного приема символа), и система (21) запишется в виде:

$$q + p_0 = 1. \qquad (22)$$

Следует заметить, что для моделей (21) и (22) первая решающая схема РС-1 (логика принятия решения) в канальном приемнике является однопороговой.

Математическая модель бинарного КС с ошибками трансформации и стирания (канал общего типа) [4, 5, 25–29]] в классической ТК имеет вид:

$$q_i + p_{ij} + p_{ix} = 1 \ (i, j \in \{0, 1\}, i \neq j, x \notin \{0, 1\}), \qquad (23)$$

где x — символ стирания, а p_{ix} — вероятность стирания символа i.

Для симметричного КС модель (23) запишется в виде:

$$q + p_0 + p_x = 1, \qquad (24)$$

где p_x — вероятность стирания символа.

Для моделей (23) и (24) приемная РС-1 должна быть двухпороговой.

В классической ТК модели (22) и (24) являются базовыми. При этом, если реальный КС — не симметричный, то всегда выполняется искусственное симметрирование канала за счет настройки РС-1.

Детальный анализ различных вариантов классических математических моделей ИК показал, что в большинстве случаев они не в полной мере отражают особенности функционирования ИК в различных возможных режимах с разными типами ошибок, тем более под действием помех большой интенсивности. Особенно это касается математических моделей недвоичных ИК (*K*-каналов), в которых используются *K*-коды. Это связано с тем, что такие модели должны учитывать новую версию предлагаемой метрики ГМК *K*-кодов, описанную в разделе 3 настоящей статьи.

Рассмотрим вариант такой модели для ИК общего типа [30-37].

Поскольку наиболее часто встречающейся ошибкой, по вероятности возникновения ошибок в канале, является однократная ошибка, то предлагается двухкаскадная модель ИК в виде двух последовательно соединенных моделей каналов *A* и *B*, в каждом из которых возможны лишь однократные ошибки.

Структурная схема двухкаскадной модели несимметричного *K*-канала общего типа приведена на рис. 2.

Аналитически модель описывается системой (25).

Граф переходных вероятностей модели показан на рис. 3.

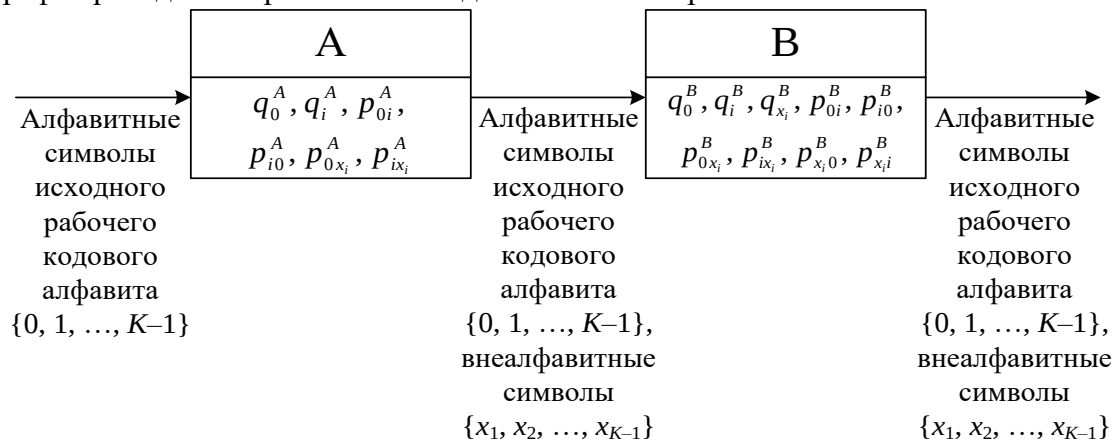


Рис. 2. Структурная схема двухкаскадной модели несимметричного *K*-канала общего типа

$$\left.\begin{aligned} q_0^A\left(q_0^B+\sum_{i=1}^{K-1}\left(p_{0i}^B+p_{0x_i}^B\right)\right)+\sum_{i=1}^{K-1}p_{0i}^A\left(q_i^B+p_{i0}^B+p_{ix_i}^B\right)+\sum_{i=1}^{K-1}p_{0x_i}^A\left(q_{x_i}^B+p_{x_i0}^B+p_{x_ii}^B\right)=1,\\ q_i^A\left(q_i^B+p_{i0}^B+p_{ix_i}^B\right)+p_{i0}^A\left(q_0^B+p_{0i}^B+p_{0x_i}^B+\sum_{j=1}^{K-1}\left(p_{0j}^B+p_{0x_j}^B\right)\right)+p_{ix_i}^A\left(q_{x_i}^B+p_{x_i0}^B+p_{x_ii}^B\right)=1,\end{aligned}\right\} \quad (25)$$

$$i, j\in\overline{1,K-1},\ \ i\neq j.$$

где $q_0^A(q_i^A)$, $q_0^B(q_i^B)$ — вероятности правильного приема нулевых (токовых) символов в каналах *A* и *B*, соответственно; p_{0i}^A (p_{i0}^A), p_{0i}^B (p_{i0}^B) — вероятности трансформации нулевых (токовых) символов в каналах *A* и *B*, соответственно; p_{0xi}^A (p_{ixi}^A), p_{0xi}^B (p_{ixi}^B) — вероятности ошибок стирания нулевых (токовых символов в каналах *A* и *B*, соответственно; q_{xi}^B — вероятность правильного приема символа стирания в канале *B*; p_{xi0}^B (p_{xii}^B) — вероятность трансформации символа стирания в нулевой (токовый) символ в канале *B*.

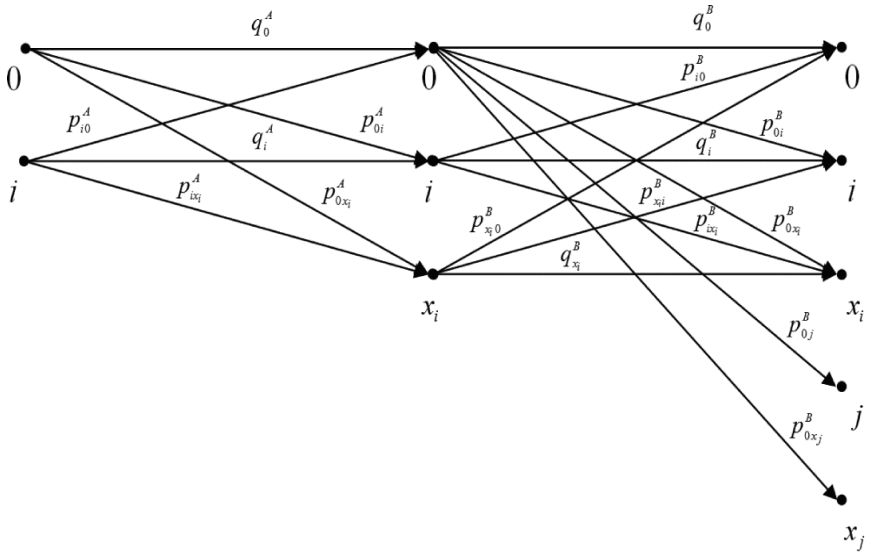


Рис. 3. Граф переходных вероятностей двухкаскадной математической модели несимметричного *K*-канала общего типа

Математическая модель (25) легко может быть преобразована для случаев моделей частного вида (только с ошибками трансформации или только с ошибками стирания).

Предложенная математическая модель позволяет улучшить качественную оценку статистики *K*-канала и, следовательно, повысить эффективность ИК и ЦСПИ в целом. В частности, это позволяет достичь более высоких показателей исходов приема информации за счет повышения корректирующей способности кодов с предложенной метрикой *K*-кода.

Заключение

На протяжении длительного периода развития классической ТК и особенно ее практического применения ведущая роль принадлежала бинарным представлениям различных аспектов кодирования. С одной стороны, это исторически сложилось, с другой стороны, на практике не было возможности эффективного использования недвоичных систем передачи информации. Между тем, сегодня приоритетным является использование *K*-кодов и, соответственно, *K*-каналов. Учитывая это, разработка и синтез математических моделей ИК на основе новой метрики *K*-кодов представляют значительный интерес, как с точки зрения теории, так и с точки зрения возможности повышения информационной надежности ИК и ЦСПИ. Отдельный интерес представляет предложенная классификация КК, существенно расширенная по сравнению с традиционно принятой в классической ТК. Это позволяет более эффективно осуществлять синтез кодов и кодеков на их основе, прежде всего для *K*-кодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shannon, C.E. Mathematical Theory of Communication / C.E. Shannon // The Bell System Technical Journal, 1948. – Vol. 27. – P. 379-423, 623-656.

2. Фано Р. М. Передача информации. Статистическая теория связи / Р.М. Фано М.: Мир, 1965. – 438 с.

3. Возенкрафт Дж. Теоретические основы техники связи / Дж. Возенкрафт, И. Джекобс. – М.: Мир, 1969. – 640 с.

4. Финк, Л.М. Теория передачи дискретных сообщений / Л.М. Финк. – М.: Сов. радио, 1970. – 728 с.

5. Юргенсон, Р.И. Помехоустойчивость цифровых систем передачи телемеханической информации / Р. И. Юргенсон. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1971. – 250 с.

6. Галлагер, Р. Г. Теория информации и надежная связь / Р. Г. Галлагер. – М.: Сов. радио, 1974.– 720 с.

7. Стиффлер Дж. Теория синхронной связи / Дж. Стиффлер. – М.: Связь, 1978. – 488 с.
8. Bernard, S. Digital Communications: Fundamentals and Applications / S. Bernard. – Prentice Hall, 2001. – 1079 p.
9. Viterbi, A.J. Principles of digital communication and coding / A.J. Viterbi, J.K. Omura. – McGraw-Hill, 1979. – 584 p.
10. Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко. [и др.]. – М.: Радио и связь. 1986. – 304 с.
11. Calderbank A. R. The Art of Signaling: Fifty Years of Coding Theory. / A.R. Calderbank // IEEE Trans. Inform.
a. Theory. – 1998. Vol. 44, № 6. P. 2561–2595.
12. Марков А. А. Введение в теорию кодирования / А. А. Марков. – М.: Наука: Физматлит, 1982. – 192 с.
13. Теория кодирования / Т. Касами [и др.] – М.: Мир, 1978. – 576 с.
14. Richardson, T. Modern Coding Theory / T. Richardson, R. Urbanke. – Cambridge University Press, 2008. – 545 p.
15. Васильев, К.К. Математическое моделирование систем связи / К.К. Васильев, М.Н. Служивый. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 170 с.
16. Hamming, R.W. Coding and Information Theory / R.W. Hamming. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1986. – 272 p.
17. Proakis, J. G. Digital Communications / J. G. Proakis. – New York: McGraw-Hill, 2000. – 936 p.
18. 18. Мак-Вильямс, Ф. Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф. Дж. Мак-Вильямс, Н. Дж. Слоэн. – М.: Связь, 1979. – 744 с.
19. Берлекэмп, Е. Р. Алгебраическая теория кодирования / Е. Р. Берлекэмп. – М.: Мир, 1971. – 477 с.
20. Блейхут, Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1986. – 576 с.
21. Питерсон, У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон. – М.: Мир, 1976. 594 с.
22. Huffman, D.A. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes / D.A. Huffman // Proceedings of the IRE 40 (9), 1952. – P. 1098-1101.
23. Кларк, Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. Кларк, Дж. Кейн. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.
24. Форни, Д. Каскадные коды / Д. Форни. – М.: Мир, 1970. – 208 с.
25. Lin, S. Error Control Coding Fundamentals and Applications / S. Lin, D. Costello. – Prentice-Hall, 1983. – 624 p.
26. Moon, T.K. Error Correction Coding / T.K. Moon. – New Jersey: Wiley – Interscience, 2005. – 794 p.
27. Morelos-Zaragoza, R.H. The Art of Error Correcting Coding / R.H. Morelos-Zaragoza. – Wiley, 2006. – 269 p.
28. Adoul, J-P.A. A critical statistic for channels with memory / J-P.A. Adoul, B.D. Fritchman, L.N. Kanal // IEEE Trans. Information Theory. – 1972. – No. 18. – P. 151-159.
29. Murthy, D.N.P. Weibull Models / D.N.P. Murthy, M. Xie, R.W. Jiang. – John Wiley & Sons Ltd., 2007. – 408 p.
30. Светлов, М.С. Параметрические оценки К-ичных и троичных ПСП-кодов в каналах со стиранием / А.А. Львов, М.С. Светлов, Ю.А. Ульянина // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 2. – № 1 (64). – С. 157−163.

31. Светлов, М.С. Синтез моделей информационных *K*-каналов с памятью/ А.А. Львов, М.С. Светлов, Ю.А. Ульянина // Компьютерные науки и информационные технологии: мат. Междунар. науч. конф. – Саратов: Издат. центр «Наука», 2014. – С. 199-204.

32. Modeling of communication channels for codes that do not contain zero signal sign / I.M. Svetlov, A.A. L'vov, M.S. Svetlov, Yu.A. Ulyanina // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. / Саратов: Издательский Дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 1. – С. 140-147.

33. Synthesis of Models of Information Channels with Memory / Y. Ulyanina, A. L'vov, O. Dolinina, M. Svetlov // Proceed. 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. –St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016. – P. 393-397.

34. Светлов, М.С. Моделирование информационных каналов с памятью / А.А. Львов, М.С. Светлов, Ю.А. Ульянина // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: сб. Тр. XXVII Междунар. науч. конф.: в 12 т.– Тамбов: Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. – Т. 4. – С. 200-205.

35. Светлов, М.С. Оценка границ избыточности недвоичных кодов / А.А. Львов, М.С. Светлов, Ю.А. Ульянина // Тр. XII Всерос. совещ. по проблемам управления ВСПУ-2014. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 9177-9187.

36. Светлов, М.С. Модели информационных *K*-каналов с памятью / А.А .Львов, М.С. Светлов, Ю.А. Ульянина // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2015. – Т. 15. – Вып. 1. – С. 106-112.

37. Анализ эффективности моделей недвоичных информационных каналов / А.А. Львов, М.С. Светлов, Ю.А. Ульянина, А.А. Гущина // Радиотехника. – 2015. – № 7. – С. 76-80.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-274-284

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. Глухарева
3. – Институт проблем точной механики и управления РАН

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИЁМОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

Аннотация. *В работе проводится оценка достоверности приёмопередачи для математических моделей информационных каналов (ИК), способных обеспечить высокий уровень информационной надежности в условиях действия помех большой интенсивности. В качестве количественной меры достоверности приёмопередачи вводится нормированная агрегата, зависящая от вероятностей исходов приёма и отражающая степень близости помехоустойчивости рассматриваемой модели ИК к помехоустойчивости систем телеуправления наивысшей категории по достоверности приёмо-передачи сообщений-команд. Для вычисления агрегаты многокаскадная модель ИК представляется в виде композиции обобщённых каскадов. В качестве входных параметров каждый каскад принимает тетраду обобщённых вероятностей изменения символов, состоящую из вероятностей "сохраняющего", "трансформирующего", "стирающего" и "трансформирующе-стирающего" воздействий. В качестве выходных параметров формируются обобщённые вероятности идентичного вида, что позволяет комбинировать обобщённые каскады в любых корректных сочетаниях и вычислять достоверность приёмопередачи для широкого ряда моделей ИК.*

Ключевые слова: *математическая модель, информационный канал, кодек, кодовый сигнальный признак, помехоустойчивость.*

Annotation. *The work evaluates reception reliability of information channel (IC) mathematical models, which provide high level of noise immunity under the influence of highly-intensive noise. To quantitatively measure reception reliability, a normalized aggregated parameter is introduced, which depends on reception outcome probabilities. The parameter characterizes the noise immunity proximity of the considered system and the best-standard remote control systems. For parameter value calculation, a multi-cascade IC model is represented as a composition of generic cascades. As input parameters each cascade receives a quaternion, which consists of "preserving", "transforming", "erasure" and "transforming-erasure" symbol modification probabilities. As output the cascade generates probabilities in the same form, wich allows arranging generic cascades into all meaningful combinations to produce a wide range of IC models and calculate their reception reliability.*

Keywords: *mathematical model, information channel, codec, code signal feature, noise immunity.*

Введение

Основной структурной единицей распределённых 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) [1–3].

При решении задач анализа и синтеза ИК актуальной проблемой является разработка математических моделей и алгоритмов, дающих возможность обеспечения требуемого уровня

информационной надёжности ИК в условиях действия помех, особенно при их 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).

Известны различные модели таких ИК повышенной помехоустойчивости. Это модели с многокаскадными кодеками [4], с кодами-произведениями (двумерными кодами, кодовыми словами которых являются кодовые слова строк (код C_1) и столбцов (код C_2) двумерных таблиц (матриц)) [5, 6], с защитным кодированием [7], с недвоичными кодами (K-ичными, $K = \{0, K_T\}$ — алфавит кодирования, $K_T = \{1,2, \dots, K-1\}$ — токовые символы алфавита), в первую очередь, без нулевого сигнального признака (K_T-кодами) [8, 9] и др., позволяющие моделировать ИК с высокими значениями показателей достоверности приёмопередачи.

Отдельно следует сказать о математических моделях ИК на базе альтернативной (не хеммингговой) метрики K-ичных кодов [10], в которой кодовое расстояние между нулевым и любым другим символом, а также между токовым символом i ($i \in K_T$) и "своим" символом стирания x_i равно 1; кодовое расстояние между двумя различными токовыми символами i, j ($i, j \in K_T, i \neq j$), а также между токовым символом i ($i \in K_T$) и "чужим" символом стирания x_j ($j \in K_T, j \neq i$) равно 2 (рис. 1). С учётом особенностей альтернативной метрики, наибольший интерес представляют собой математические модели ИК с K_T-кодами.

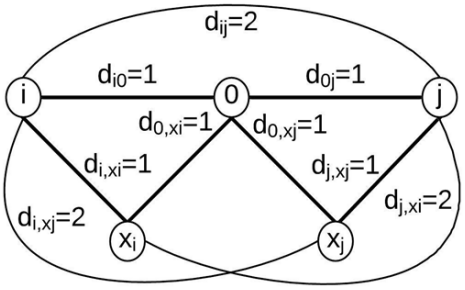


Рис. 3. Геометрическая интерпретация альтернативной метрики K-ичных кодов

В предыдущих работах авторов была предложена двухкаскадная математическая модель ИК с применением некоторого корректирующего первичного кода (ПК) и вторичного кода (ВК) на основе кодового сигнального признака (КСП) в последнем каскаде кодирования [11–14].

ВК на основе КСП по своей структуре является двоичным комбинаторным нелинейным неразделимым кодом с постоянным весом. Его кодовые слова представляют собой двоичные последовательности длины n с первыми и последними единичными символами. Все последовательности имеют одинаковый вес $m_1 \geq 3$, другими словами, в каждой из них — m_1 единичных символов. Множество A кодовых слов ВК содержит K кодовых слов — по числу символов в алфавите ПК: $A = \{A_i\}_{i \in \{K\}}$ (в случае первичных K_T кодов $A = \{A_i\}_{i \in \{K_T\}}$). Структура кода с КСП подробно рассмотрена ранее (например, в [3]). Также для кода с КСП разработаны алгоритмы кодирования-декодирования [13, 14] и синтезированы формулы вычисления вероятностей исходов приёма [15, 16].

Целью данной статьи является оценка достоверности приёмопередачи классических и новых моделей ИК, способных обеспечить высокий уровень информационной надежности в условиях действия помех большой интенсивности.

Выбор математических моделей ИК для сравнения

Анализ математических моделей ИК, способных обеспечить требуемые показатели информационной надёжности в условиях действия импульсных случайных помех большой интенсивности, позволил для сравнения достоверности приёмопередачи выбрать пять моделей, внешние каскады кодирования которых используют корректирующий ПК с длиной n_K кодовых слов и значением d_{min} минимального кодового расстояния. Однако при этом режимы работы

кодеков могут различаться в зависимости от количества обнаруживаемых (r) и исправляемых (s) ошибок трансформации и исправляемых (e) ошибок стирания в пределах корректирующей способности ПК, определяемой значением d_{min} [17]: $d_{min} \geq r + s + e + 1, s \leq r$.

Рассматриваемые математические модели ИК:

1. Однокаскадная модель с хеммингговой метрикой и кодеком ПК в комбинированном режиме: обязательное исправление всех обнаруженных ошибок трансформации ($s = r$), исправление ошибок стирания;

2. Однокаскадная модель с альтернативной метрикой K_T-кода и кодеком ПК в комбинированном режиме;

3. Двухкаскадная модель с ВК на основе КСП и кодеком ПК в комбинированном режиме;

4. Двухкаскадная модель с ВК на основе КСП и кодеком ПК в режиме исправления только ошибок стирания ($r = s = 0$);

5. Однокаскадная модель с использованием кода-произведения, состоящего из двух корректирующих кодов в комбинированном режиме.

Оценка достоверности приёмопередачи

Для построения математических зависимостей для вышеупомянутых моделей ИК и сравнения достоверности приёмопередачи, количественно характеризующейся значениями вероятностей правильного (p_{cr}) и ложного (p_{fr}) приёмов, а также вероятности защитного отказа (p_{pf}), каждая модель M_ϕ представляется как последовательный набор обобщённых каскадов кодирования-декодирования $M_\phi = \{KS_{\phi\nu}\}_{\nu\in[1..N_\phi]}$. При этом к обобщённым каскадам, помимо стандартных каскадов ПК и ВК, также будем относить и КС (независимо от используемой метрики кода). Для каждой модели введем в рассмотрение нормированную агрегату (коэффициент достоверности) $0 \leq \eta_\phi \leq 1$, не зависящую в явном виде от вероятности правильного приёма:

$$\eta_\phi = -\log\left(\max\left(\left(p_{fr}\right)_\phi + \left(p_{pf}\right)_\phi^\beta, 10^{-14}\right)\right) / -\log\left(10^{-14}\right), \quad (1)$$

где $\beta \geq 0$. Коэффициент η_ϕ характеризует близость помехоустойчивости (по значению вероятности трансформации (ложного приема) сообщения-команды) ф-й математической модели к помехоустойчивости систем телеуправления первой категории (наивысшей категории по достоверности приёмопередачи) по ГОСТ 26.205-88 [18].

Значения вероятностей исходов приёма, следовательно, и коэффициента η_ϕ зависят от интенсивности помех i_{pn} и их статистических характеристик. Т.к. прежде всего рассматривается случай помех большой интенсивности, то количество импульсов помех, воздействующих на передаваемые кодовые комбинации, может быть произвольным при условии, что $i_{pn} \geq 3$. Считаем, что поток импульсных случайных помех подчиняется закону распределения Пуассона: вероятность воздействия k_{pn} импульсов помех вычисляется по формуле:

$$p\left(k_{pn}\right) = \frac{\left(i_{pn}\right)^{k_{pn}}}{k_{pn}!} e^{-i_{pn}}. \quad (2)$$

Физическая природа помех может быть разнообразной, поэтому будем рассматривать статистические характеристики помех в обобщённом виде, а именно как тетраду вероятностей $p_g = (p_p, p_s, p_e, p_{se})$ $(0 \leq p_p, p_s, p_e, p_{se} \leq 1, \quad p_p + p_s + p_e + p_{se} = 1)$ атомарных воздействий одного импульса помехи, где:

– p_p — вероятность "сохраняющего" воздействия, т.е. не изменяющего символ исходного алфавита или символ стирания;

– p_s — вероятность "трансформирующего" воздействия, т.е. переводящего исходный алфавитный символ в некоторый другой алфавитный символ (в какой именно, зависит от используемой метрики модели) или же переводящего символ стирания в символ 0;

– p_e — вероятность "стирающего" воздействия, т.е. переводящего алфавитный символ в "свой" (соответствующий) символ стирания и наоборот, символ сирания в "свой" алфавитный символ;

– p_{se} — вероятность "трансформирующе-стирающего" воздействия, переводящего алфавитный символ в "чужой" (несоответствующий) символ стирания. Этот вид воздействия соответствует многократной помехе и выносится в отдельную категорию, что связано с алгоритмами декодирования стирающего символа в канале со стираниями по Элайесу [19, 20]. Принятый символ стирания параллельно декодируется в двух каскадах декодирования (КДК), причём в один из КДК символ стирания поступает как 0, а в другой — как "свой" алфавитный символ. При этом предполагается, что хотя бы в один из КДК поступил правильный исходный символ. При появлении на месте некоторого алфавитного символа "чужого" символа стирания, последнее предположение не выполняется, и в каждый из КДК поступает символ, отличный от исходного. Поэтому для восстановления исходной комбинации, помимо обработки ошибки стирания, необходимо дополнительное исправление ещё и ошибки трансформации, что требует более высокой корректирующей способности кода.

Будем также считать, что каждый обобщённый каскад, начиная с внутреннего каскада, выполняет преобразование входных обобщённых вероятностей p_g в выходные обобщённые вероятности p'_g. При этом типы воздействий остаются прежними: "сохраняющее", "трансформирующее", "стирающее" и "трансформирующе-стирающее".

Итоговые вероятности исходов приёма вычисляются как отдельные функции внешнего каскада кодирования, зависящие от его обобщённых входных вероятностей.

Рассмотрим более подробно формулы преобразования обобщённых вероятностей для каждого из типов обобщённых каскадов.

КС. Подсчёт обобщённых вероятностей для КС происходит в три этапа:

1. Синтез матрицы P_1 вероятностей переходов символов друг в друга под воздействием одного импульса помехи по входным вероятностям p_g;

2. Построение матрицы P вероятностей переходов символов друг в друга при воздействии произвольного количества импульсов помех с учётом интенсивности i_{pn} их появления;

3. Получение выходных обобщённых вероятностей p'_g по матрице воздействий, полученной на предыдущем шаге.

Шаг 1 зависит от метрики кода — построенные матрицы различны для кодов с метрикой Хемминга и кодов с альтернативной метрикой. Шаг 2 выполняется одинаково для всех видов КС. Шаг 3 зависит от наличия или отсутствия нулевого сигнального признака на входе КС. При отсутствии нулевого сигнального признака во входном алфавите КС его появление на выходе КС трактуется как появление символа стирания.

Для КС без стираний с кодовой метрикой Хемминга матрица P_1 имеет следующую структуру:

$$\begin{array}{cccccc} & 0 & 1 & \cdots & K-1 \\ 0 & p_p & \frac{p_s}{K-1} & \cdots & \frac{p_s}{K-1} \\ 1 & \frac{p_s}{K-1} & p_p & \cdots & \frac{p_s}{K-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K-1 & \frac{p_s}{K-1} & \frac{p_s}{K-1} & \cdots & p_p \end{array},$$

а для КС со стираниями:

$$\begin{array}{ccccccccc} & 0 & 1 & 2 & \cdots & K-1 & X_1 & X_2 & \cdots & X_{K-1} \\ 0 & p_p & \frac{p_s}{K-1} & \frac{p_s}{K-1} & \cdots & \frac{p_s}{K-1} & \frac{p_b}{K-1} & \frac{p_b}{K-1} & \cdots & \frac{p_b}{K-1} \\ 1 & \frac{p_s}{K-1} & p_p & \frac{p_s}{K-1} & \cdots & \frac{p_s}{K-1} & p_b & 0 & \cdots & 0 \\ 2 & \frac{p_s}{K-1} & \frac{p_s}{K-1} & p_p & \cdots & \frac{p_s}{K-1} & 0 & p_b & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K-1 & \frac{p_s}{K-1} & \frac{p_s}{K-1} & \frac{p_s}{K-1} & \cdots & p_p & 0 & 0 & \cdots & p_b \\ X_1 & p_s & p_b & 0 & \cdots & 0 & p_p & 0 & \cdots & 0 \\ X_2 & p_s & 0 & p_b & \cdots & 0 & 0 & p_p & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{K-1} & p_s & 0 & 0 & \cdots & p_b & 0 & 0 & \cdots & p_p \end{array}$$

Для КС с альтернативной кодовой метрикой при отсутствии стираний матрица P_1 имеет вид:

$$\begin{array}{cccccc} & 0 & 1 & \cdots & K-1 \\ 0 & p_p & \frac{p_s}{K-1} & \cdots & \frac{p_s}{K-1} \\ 1 & p_s & p_p & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K-1 & p_s & 0 & \cdots & p_p \end{array},$$

а при их наличии:

	0	1	2	⋯	$K-1$	X_1	X_2	⋯	X_{K-1}
0	p_p	$\frac{p_s}{K-1}$	$\frac{p_s}{K-1}$	⋯	$\frac{p_s}{K-1}$	$\frac{p_b}{K-1}$	$\frac{p_b}{K-1}$	⋯	$\frac{p_b}{K-1}$
1	p_s	p_p	0	⋯	0	p_b	0	⋯	0
2	p_s	0	p_p	⋯	0	0	p_b	⋯	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮
$K-1$	p_s	0	0	⋯	p_p	0	0	⋯	p_b
X_1	p_s	p_b	0	⋯	0	p_p	0	⋯	0
X_2	p_s	0	p_b	⋯	0	0	p_p	⋯	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮
X_{K-1}	p_s	0	0	⋯	p_b	0	0	⋯	p_p

Перед выводом формулы шага 2 докажем вспомогательную лемму о вероятности переходов символов друг в друга при воздействии ровно n_{pn} импульсов помех.

Лемма 1. Матрица $P(n_{pn})$ вероятностей преобразования символов друг в друга при воздействии ровно n_{pn} импульсов помех выражается формулой:

$$P\left(n_{pn}\right)=\left(P_1\right)^{n_{pn}}. \quad (3)$$

Доказательство. Доказательство проводится по методу индукции. База индукции тривиальна: $P(1)=(P_1)^1$. Докажем шаг индукции. Пусть формула справедлива для $n_{pn}=k_{pn}$. Докажем её для $n_{pn}=k_{pn}+1$. Вычислим вероятность перехода произвольного символа i_0 в символ j_0 ($i_0, j_0 \in \overline{K}$) при воздействии ровно $k_{pn}+1$ импульсов помех. Здесь $\overline{K}=\{0,1,\dots,K-1\}$ при отсутствии стираний и $\overline{K}=\{0,1,\dots,K-1,x_1,x_2,\dots,x_{K-1}\}$ при их наличии. Т.к. помехи воздействуют независимо друг от друга, можно разбить их на две группы: k_{pn} импульсов помех и оставшийся импульс. Воздействие группы из k_{pn} помех может перевести символ i_0 в произвольный символ $t_0 \in \overline{K}$. Это происходит с вероятностью $P(k_{pn})_{i_0 t_0}$. Чтобы в итоге получить символ j_0, оставшийся отдельный импульс помехи должен перевести t_0 в j_0. Вероятность этого события равна $P(1)_{t_0 j_0}$. Таким образом, вероятность перехода символа i_0 в j_0 через t_0 запишется в виде $P(k_{pn})_{i_0 t_0} P(1)_{t_0 j_0}$. Т.к. символ t_0 взят произвольно, для получения общей вероятности необходимо просуммировать данное выражение по всем возможным $t_0 \in \overline{K}$:

$$P(k_{pn}+1)_{i_0 j_0}=\sum_{t\in\overline{K}} P\left(k_{pn}\right)_{i_0 t} P(1)_{t j_0}. \quad (4)$$

С другой стороны, привычная формула произведения $P(k_{pn})\cdot P(1)$ записывается в виде:

$$\left(P\left(k\right)\cdot P\left(1\right)\right)_{ij}=\sum_{t\in\overline{K}} P\left(k_{pn}\right)_{it} P(1)_{tj}. \quad (5)$$

Несложно видеть, что формулы (4) и (5) отличаются только обозначениями индексов, а значит $P(k_{pn}+1)=P(k_{pn})\cdot P(1)=(P(1))^{k_{pn}}\cdot P(1)=(P_1)^{k_{pn}+1}$. Таким образом, формула (3) доказана. □

На шаге 2 построение матрицы P вероятностей переходов символов друг в друга при воздействии произвольного количества импульсов помех с учётом интенсивности i_{pn} их появления производится по формуле $P=\sum_{k_{pn}=0}^{\infty} p(k_{pn})(P_1)^{k_{pn}}$, где $p(k_{pn})$ вычисляется по формуле (2).

Наконец, для получения выходных обобщённых вероятностей (шаг 3) проводится суммирование по всем алфавитным символам (исключая символы стирания). Предполагается, что на входе появление разрешённых алфавитных символов равновероятно. В общем случае это

не так, но для оценки помехоустойчивости ИК данное упрощение не является принципиальным. Выходные вероятности вычисляются по следующим формулам: для КС без стираний:

$$\left\{ p_p^{'} = \frac{1}{K}\sum_{i=0}^{K-1} P_{ii} \quad p_s^{'} = \frac{1}{K}\sum_{i=0}^{K-1}; \sum_{j=0,\, j\neq i}^{K-1} P_{ij} \quad p_e^{'} = 0;\ p_{se}^{'} = 0, \right\} \tag{6}$$

для КС со стираниями присутствует разделение на "свои" и "чужие" символы стирания, причём для символа 0 все символы стирания являются "своими":

$$\left\{ \begin{array}{c} p_p^{'} = \frac{1}{K}\sum_{i=0}^{K-1} P_{ii} \ \ p_s^{'} = \frac{1}{K}\sum_{i=0}^{K-1}; \sum_{j=0,\, j\neq i}^{K-1} P_{ij} \\ p_e^{'} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K-1}; \left(P_{0x_i} + P_{ix_i}\right) \ \ p_{se}^{'} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K-1}. \sum_{j=1,\, j\neq i}^{K-1} P_{ix_j} \end{array} \right\} \tag{7}$$

Для КС без использования нулевого сигнального признака, как указывалось выше, появление нуля равносильно появлению "своего" символа стирания, а появление символа стирания x_i ($i \in K_T$) трактуется как появление символа i. Следовательно, формулы для выходных вероятностей для КС без стираний имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{c} p_p^{'} = \frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K-1} P_{ii} \ \ p_s^{'} = \frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K-1}; \sum_{j=1,\, j\neq i}^{K-1} P_{ij} \\ p_e^{'} = \frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K-1} P_{i0} \ \ p_{se}^{'} = 0, \end{array} \right\} \tag{8}$$

а для КС со стираниями:

$$\left\{ \begin{array}{c} p_p^{'} = \frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K-1}; \left(P_{ii} + P_{ix_i}\right) \ \ p_s^{'} = \frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K-1}; \sum_{j=1,\, j\neq i}^{K-1} \left(P_{ij} + P_{ix_j}\right) \\ p_e^{'} = \frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K-1} P_{i0} \ \ p_{se}^{'} = 0. \end{array} \right\} \tag{9}$$

ВК на основе КСП. Применение ВК с КСП возможно как для ИК только с трансформациями, так и для ИК общего вида, в которых присутствуют как трансформации, так и стирания. Для этих типов ИК в работах [15] и [16] выведены формулы для вычисления вероятностей исходов приёма (p_{cr}, p_{fr}, p_{pf}) для кода с КСП. С незначительными изменениями эти формулы могут применяться для вычисления выходных обобщённых вероятностей для обобщённого каскада, представленного кодом с КСП:

$$\left\{ p_p^{'} = p_{cr};\ p_s^{'} = p_{fr};\ p_e^{'} = p_{pf};\ p_{se}^{'} = 0 \right\}. \tag{10}$$

Корректирующий код. Для каскада, представленного корректирующим кодом, считаем заданными разрядности кодовых слов n_K, его информационной m_K и контрольной $k_K = n_K - m_K$ частей, минимальное кодовое расстояние d_{min}, а также кратности обнаруживаемых r и исправляемых $s \leq r$ ошибок трансформации и исправляемых e ошибок стирания в пределах корректирующей способности ПК.

Для определения выходных характеристик данного каскада важны количества правильно принятых символов ($np \geq 0$), ошибок трансформации ($ns \geq 0$), ошибок стирания в "свой" ($ne \geq 0$) и стирания в "чужой" ($nse \geq 0$) символ стирания, произошедшие в кодовом слове, причём местоположение ошибок внутри кодовых слов роли не играет. Для указанных количеств верно соотношение $np + ns + ne + nse = n_K$. Обозначим через $p_{np,ns,ne,nse}$ вероятность появления состояния с указанным количеством ошибок перечисленных типов. Несложно показать, что верна формула:

$$p_{np,ns,ne,nse} = C_{n_K}^{np} C_{n_K-np}^{ns} C_{n_K-np-ns}^{ne} p_p^{np} p_s^{ns} p_e^{ne} p_{se}^{nse}. \quad (11)$$

Формула (11) используется для дальнейших расчётов. Если данный каскад не является внешним, то вычисляются выходные обобщённые вероятности p'_g с учётом корректирующей способности кода. Формулы расчёта похожи на формулы вычисления битового коэффициента ошибок, но с разделением на типы ошибок. Если ошибка не исправлена в данном каскаде, то, возможно, она будет исправлена в одном из каскадов, внешних по отношению к данному.

Рассматриваются два случая: когда все ошибки стирания могут быть скорректированы ($ne + nse \le e$) и когда — нет. В первом случае вычисление итоговых вероятностей происходит по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{c} p_p^{'} = p_{np,ns,ne,nse} \dfrac{n_K - max\left(0, ns + nse - s\right)}{n_K}; \\ p_s^{'} = p_{np,ns,ne,nse} \dfrac{max\left(0, ns + nse - s\right)}{n_K}; p_e^{'} = 0; p_{se}^{'} = 0. \end{array} \right\} \quad (12)$$

Во втором случае не все ошибки стирания могут быть скорректированы, поэтому дополнительно учитывается, сколько ошибок стирания исправлено на позициях, где произошли стирания в "свой" символ ($0 \le xe \le ne$), и сколько — на позициях со стираними в "чужой" символ ($0 \le ye \le nse,\ xe + ye = e$). Считаем, что коррекции на каждом из типов позиций равновероятны. Последующие коррекции ошибок трансформации возможны или на тех позициях, где возникли только ошибки трансформации, или где ошибки стирания в "чужой" символ были исправлены:

$$\left\{ \begin{array}{c} p'_p = \sum_{xe=\max(0,e-nse)}^{\min(e,ne)} \dfrac{C_{ne}^{xe} C_{nse}^{e-xe}}{C_{ne+nse}^{e}} p_{np,ns,ne,nse} \dfrac{n_K - (ne+nse-e) - ns'}{n_K}; \\ p'_s = \sum_{xe=\max(0,e-nse)}^{\min(e,ne)} \dfrac{C_{ne}^{xe} C_{nse}^{e-xe}}{C_{ne+nse}^{e}} p_{np,ns,ne,nse} \dfrac{ns'}{n_K}; \\ p'_e = \sum_{xe=\max(0,e-nse)}^{\min(e,ne)} \dfrac{C_{ne}^{xe} C_{nse}^{e-xe}}{C_{ne+nse}^{e}} p_{np,ns,ne,nse} \dfrac{ne-xe}{n_K}; \\ p'_{se} = \sum_{xe=\max(0,e-nse)}^{\min(e,ne)} \dfrac{C_{ne}^{xe} C_{nse}^{e-xe}}{C_{ne+nse}^{e}} p_{np,ns,ne,nse} \dfrac{nse-(e-xe)}{n_K}, \end{array} \right. \quad (13)$$

здесь $ns' = \max(0, ns + e - xe - s)$ — количество не исправленных ошибок трансформации. Для получения итоговых выходных вероятностей формулы (12) и (13) суммируются по всем допустимым состояниям, т.е. состояниям, в которых $np + ns + ne + nse = n_K$.

Если же данный каскад является внешним, то вычисляются итоговые вероятности исходов приёма:

$$\left\{ \begin{array}{c} p_{cr} = \sum_{\substack{np+ns+ne+nse=n_K \\ 0 \le ns+nse \le s \\ 0 \le ne+nse \le e}} p_{np,ns,ne,nse}; \\ p_{fr} = \sum_{\substack{np+ns+ne+nse=n_K \\ r < ns+nse \le n_K \\ 0 \le ne+nse \le e}} p_{np,ns,ne,nse}; \\ p_{pf} = \sum_{\substack{np+ns+ne+nse=n_K \\ s < ns+nse \le r \\ 0 \le ne+nse \le e}} p_{np,ns,ne,nse} + \sum_{\substack{np+ns+ne+nse=n_K \\ e < ne+nse \le n_K}} p_{np,ns,ne,nse}. \end{array} \right. \quad (14)$$

Код-произведение (двумерный код). Для кода-произведения считаем, что известны параметры кодов C_1 $(d_{min,1}, r_1, s_1, e_1)$ и C_2 $(d_{min,2}, r_2, s_2, e_2)$. Т.к. обобщённые вероятности вычисляются отдельно и независимо для каждого символа, то для получения выходных обобщённых вероятностей для внутреннего кода-произведения достаточно вычислить выходные обобщённые веротности для кода C_2, а затем использовать их как входные для кода C_1. Аналогично, если код-произведение является внешним кодом, то для определения вероятностей

исходов приёма кода-произведения необходимо вычислить вероятности исходов приёма для кода C_1, используя выходные обобщённые вероятности кода C_2 в качестве входных для кода C_1.

Таким образом, комбинируя обобщённые каскады в любом корректном сочетании, используя формулы (6)–(10), (12)–(14), можно получить итоговые вероятности исходов приёма по обобщённым вероятностям атомарных воздействий одного импульса помехи и интенсивности помех i_{pn}, взятой в пересчёте на один символ ПК, передаваемый по КС, а затем вычислить значение агрегаты η_ϕ по формуле (1).

Анализ результатов

В данном разделе для примера приведена оценка достоверности приёмопередачи выбранных моделей ИК для следующих параметров: ПК — троичный ($K = 3$) с битовой структурой. Кодовые слова ПК имеют длину $n_K = 8$, причём $k_K = m_K = 4$. Такой ПК имеет минимальное кодовое расстояние $d_{min} = 4$. Предполагается, что на входе ПК появление разрешённых алфавитных символов равновероятно. Код на основе КСП — с весом кодовых слов $m_1 = 3$. Значения агрегаты η_ϕ приведены для $\beta = 1.5$ в зависимости от интенсивности помех для следующих начальных обобщённых вероятностей: $p_p = 0.75$, $p_s = 0.1$, $p_e = 0.15$ (рис. 2а); $p_p = 0.75$, $p_s = 0.25$, $p_e = 0$ (рис. 2б).

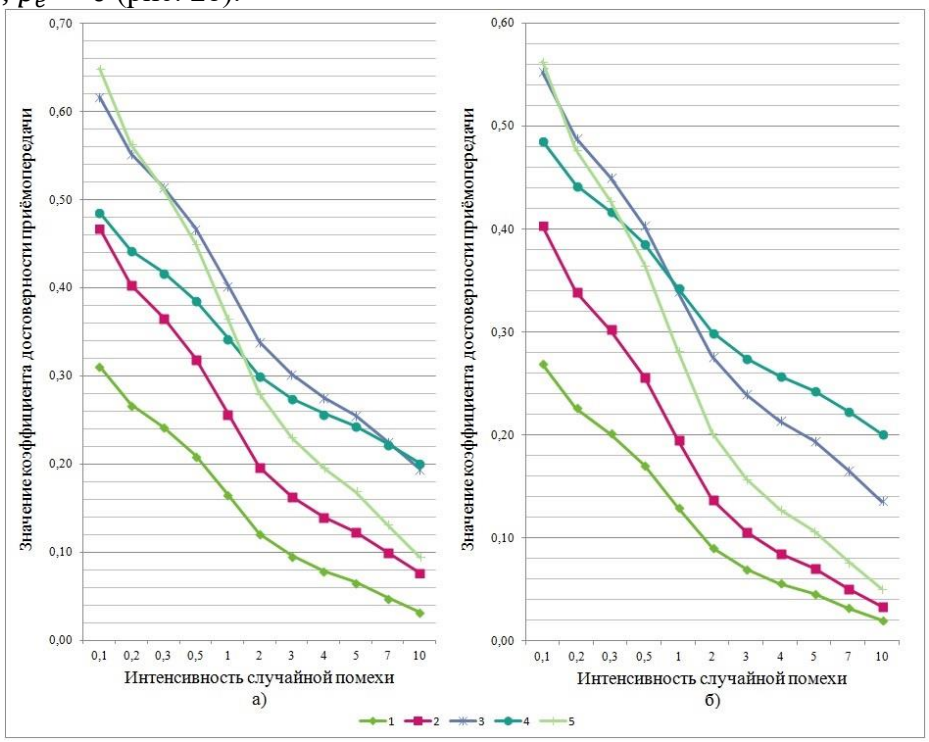


Рис. 2. Значение коэффициента $\boldsymbol{\eta_\phi}$ для моделей ИК при различных интенсивностях помех при наличии (а) и при отсутствии стираний (б) в КС. Сравниваемые модели: 1 — модель с классическим КС и ПК в комбинированном режиме ($\boldsymbol{s = r}$); 2 — модель с КС с альтернативной метрикой и $\boldsymbol{K_T}$-ПК в комбинированном режиме ($\boldsymbol{s = r}$); 3 — модель с защитным кодированием кодом с КСП и ПК в комбинированном режиме ($\boldsymbol{s = r}$); 4 — модель с защитным кодированием кодом с КСП и ПК в режиме исправления только ошибок стирания ($\boldsymbol{r = s = 0}$); 5 — модель с кодом-произведением, состоящим из двух корректирующих кодов в комбинированном режиме ($\boldsymbol{s = r}$).

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что при малой интенсивности помех ($i_{pn} < 1$) наилучшей является модель с кодом-произведением. Также высокие показатели достоверности приёмопередачи демонстрирует модель с K_T-кодом и альтернативной метрикой КС. При средней

интенсивности помех ($1 \leq i_{pn} < 3$) использования K_T-кодов и КС с альтернативной метрикой уже не достаточно: нужна или модель с кодом-произведением, или модели с защитным кодом на основе КСП. При большой интенсивности помех ($i_{pn} \geq 3$) модели с применением защитного кода на основе КСП значительно превосходят остальные рассматриваемые модели.

Заключение

В работе проведена оценка достоверности приёмопередачи классических и новых моделей ИК, способных обеспечить высокий уровень информационной надежности в условиях действия помех большой интенсивности. Показано, что в этих условиях наилучшие результаты демонстрируют математические модели ИК с применением защитного кода на основе КСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки: пер. с англ. / Под редакцией Добрушина Р.Л. и Самойленко С.И. М.: Мир. 1976. 594 с.

2. Голомб С. Цифровые методы в космических системах связи. М.: Связь. 1969. 274 с.

3. Львов А.А., Светлов М.С., Мартынов П.В. Повышение информационной надёжности цифровых систем с QAM/COFDM модуляцией // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: "Математика. Механика. Информатика". 2014. Т. 14. № 4. Ч. 1. С. 473–482.

4. Forney D. Concatenated Codes. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology. 1965. 104 p.

5. Lin S., Weldon E.J. Further results on cyclic product codes // IEEE Transactions on Information Theory. 1970. V. IT-16. № 4. P. 452–459.

6. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. Пер. с англ.: Грушко И.И., Блиновский В.М. / Под ред. Зигангирова К.Ш. М.: Мир. 1986. 576 с.

7. Юргенсон Р.И. Помехоустойчивость цифровых систем передачи телемеханической информации. Л.: Энергия. 1971. 252 с.

8. Ирвин Дж., Харль Д. Передача данных в сетях: инженерный подход. СПб.: БВХ-Петербург. 2003. 448 с. ISBN: 5-94157-113-5.

9. Сухман С.М., Бернов А.В., Шевкопляс Б.В. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений. Эко-Трендз. 2003. 272 с. ISBN: 5-88405-046-1.

10. Ульянина Ю.А., Львов А.А., Светлов М.С. Математические модели каналов связи для кодов, не содержащих нулевого сигнального признака // сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф "Математические методы в технике и технологиях" (ММТТ-26) в 10 т. под общ. ред. Большакова А.А. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т. 2013. Т. 10. С. 101–103.

11. Светлов М. С., Львов А. А., Кленов Д. В., Львов П. А., Светлова М. К. Математическая модель информационного канала повышенной помехоустойчивости цифровых систем стандарта DVB-T2 // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 5. С. 89–100. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-5-89-100.

12. Львов А. А., Светлов М. С., Кленов Д. В., Светлова М. К. Анализ и оценка помехоустойчивости информационного канала с кодеком на базе кодового сигнального признака // Радиотехника. 2018. № 9. С. 27–31. DOI: 10.18127/j00338486-201809-06.

13. Svetlov M.S., L'vov A.A., Klenov D.V., Dolinina O.N. Self-synchronized encoding and decoding algorithms based on code signal feature // Proc. of the 27th Int. Conf. "Radioelektronika" (RADIOELEKTRONIKA). Brno, Czech Republic. 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2017.7936641.

14. Svetlov M.S., L'vov A.A., Klenov D.V., Dolinina O.N. Algorithms of Coding and Decoding for Code with Code Signal Feature // Proc. of the 2017 IEEE Conf. of Russian Young

Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg, Russia. 2017. P. 748–752. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910666.

15. Светлов М.С., Львов А.А., Кленов Д.В., Вагарина Н.С., Светлова М.К. Математическая модель информационного канала общего вида с кодеком на базе кодового сигнального признака // Труды VIII Междунар. науч. конф. памяти А.М. Богомолова "Компьютерные науки и информационные технологии" (КНиИТ-2018). Саратов. 2018. С. 346–350.

16. Klenov D.V., Svetlov M.S., L'vov A.A., Svetlova M.K., Mishchenko D.A. Synthesis of the information channel with codec based on code signal feature // Proc. of Int. Conf. "Information and Communication Technologies for Industry and Research" (ICIT-2019). Saratov. 2019. P. 199–214. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_18.

17. Зюко А.Г., Кловский Д.Д. Теория электрической связи. М.: Радио и связь. 1999. 432 с.

18. ГОСТ 26.205-88. Комплексы и устройства телемеханики. Общие технические условия.

19. Elias P. Error-free coding. IEEE Trans. Inform. Theory. 1954. No 4. P. 29–37.

20. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. Ульяновск: УлГТУ. 2010. 379 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-285-292

Шаров Сергей Николаевич, Соловьева Валентина Владимировна

АО «Концерн «Гранит-Электрон», Санкт-Петербург

СИНТЕЗ И ОБРАБОТКА СЛОЖНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Аннотация. *Для подшумовой локации окружающей среды и объектов используются сложные локационные сигналы с бинарной кодоимпульсной модуляцией, изменением частоты и фазовой модуляции внутри каждого кванта, а также их сочетания. В работе рассматриваются особенности синтеза этих сигналов и влияние их параметров на обнаружение эхо-сигналов. Эффективность методов обработки оценивается по отношению сигнал/шум для одиночных и пачки эхо-сигналов.*

Ключевые слова: *радиолокационные средства, активная гидроакустика, лазерная локация.*

Структура сложных радиолокационных сигналов

В последние три десятилетия активно развиваются локационные устройства со сложными зондирующими сигналами: с кодо-импульсной модуляцией; с внутриимпульсным кодированием модуляции частоты и фазы внутри каждого кванта, а также их различные сочетания [1-7], которые можно объединить аббревиатурой КЧФМ сигналы. Наиболее широко такие сигналы используются в радиолокационных системах скрытного мониторинга окружающего пространства и поверхности Земли. Рассматриваются возможности использования сложных сигналов в гидроакустических системах, где «подшумовая» локация наиболее безопасна для обитателей морской среды. Имеется принципиальная возможность использования сложных сигналов в лазерных локационных системах с поляризационной бинарной модуляцией.

Такие сигналы обеспечивают максимальную скрытность радиолокационного наведения ракет за счёт малой импульсной мощности каждого кванта сигнала на уровне, который на порядок ниже уровня шума. Без знания параметров этого сигнала (не только несущей частоты, но и функции модуляции частоты, фазы и амплитуды) средствам радиоэлектронной разведки невозможно осуществить его оптимальный приём (обнаружить сигнал на фоне естественного шума). Отметим, что эти параметры могут меняться от импульса к импульсу в значительном диапазоне, например, по случайному закону.

Реализация таких сигналов различными схемотехническими средствами определяется возможностями существующей элементной базы. Наиболее перспективным способом формирования сложных сигналов является использование высокоскоростных интегральных синтезаторов-модуляторов, функционирующих на принципе прямого цифрового синтеза частоты (DDS) [6–10]. Синтез зондирующего сигнала проводится на промежуточной частоте $F_{\text{пр}}$ радиолокационной станции, где используется бинарный (1, –1) многоразрядный код разбиения длительности сигнала $T_{\text{с}}$ на N_k квантов длительностью $\tau_{\text{кв}}$. Бинарный код полагает два способа модуляции сигнала внутри кванта, например, изменение частоты или фазы сигнала.

Формирование различных типов бинарных сигналов

Распространённым видом сложного сигнала, в котором используется бинарное квантование, является фазоманипулированный (ФМ) сигнал $U(t)$:

$$\begin{cases} U(t) = \sin(2\pi F_{пр} t), \text{если признак кванта} K = 1 \\ U(t) = -\sin(2\pi F_{пр} t), \text{если признак кванта} K = -1 \end{cases} \quad (1)$$

Для этого сигнала достоинством является относительная простота реализации и равномерное распределение мощности по квантам. Основной недостаток такого сигнала в том, что в нем наблюдаются скачки изменения величины сигнала на стыке квантов с различными признаками (1 или –1). Такие скачки обнаруживаются приёмником с полосой пропускания, сдвинутой в область высоких частот более чем в 2-4 раза относительно $F_{\text{пр}}$, что понижает скрытность такого сигнала [10].

Для более сложного сигнала, частота $F_{\text{пр}}$ имеет постоянные, но разные, значения для квантов:

$$\begin{cases} U = \sin(2\pi F_{пр} t + \varphi), если\ K = 1 \\ U = \sin(2\pi(F_{пр} + \Delta F)t + \varphi, если\ K = -1 \end{cases} \quad (2)$$

где φ – начальная фаза колебаний в каждом кванте сигнала.

Если $K = 0$ до появления признака кода $K = 1$ или $K = –1$, то φ = 0 или другому известному значению, соответствующему частоте $F_{\text{пр}}$.

Для последующих квантов за начальную фазу колебаний принимается конечная фаза колебаний предыдущего кванта.

Такой сигнал лишён недостатков предыдущих вариантов. Однако стыковка сигналов по фазе не избавила от скачкообразного изменения скорости сигнала на стыке квантов. Стремление избежать этого явления привело к появлению сигнала с переменой частотой в каждом кванте. Это обеспечивает ликвидацию скачков сигнала и скорости его изменения, а также исключает многократное повторение отличительных признаков сигнала по частоте и фазе в соседних квантах с одинаковым признаком бинарного кода.

Здесь внутри каждого кванта производится модуляция частоты по линейному закону (ЛЧМ). Выходной сигнал в каждом кванте:

$$\begin{cases} U_{1i} = \sin(2\pi F_{i-1}(1 + k_{f1}t)t + \varphi_{i-1}, если K = 1 \\ U_{2i} = \sin(2\pi F_{i-1}(1 - k_{f2}t)t + \varphi_{i-1}, если K = -1 \end{cases} \quad (3)$$

где $U_{1\text{i}}$ и $U_{2\text{i}}$ – сигналы с признаком кванта 1 и –1; $F_{\text{i-1}}$ и $\varphi_{\text{i-1}}$ – частота и фаза сигнала в конечный момент предыдущего кванта; k_{f1} и k_{f2} – коэффициенты изменения частоты в течение кванта (увеличения или уменьшения в зависимости от признака кода 1 или –1). В частных случаях $k_{\text{f1}} = k_{\text{f2}}$, но имеют разные знаки или один из них равен 0. Такой сигнал обладает наибольшей скрытностью, но требует повышенной частоты для внутри квантового формирования сигнала. В приведенном в [8] примере частота формирования этого сигнала повышена в 10 раз, по сравнению с предыдущими типами сигналов (1) и (2).

Выбор бинарного кода для формирования сигнала

Для модуляции сложного сигнала используются различные бинарные последовательности [5, 8, 9]. В зависимости от режима работы радиолокатора используются последовательности из 32-х, 64-х и 128-и квантов.

В каждом зондирующем импульсе используется новая кодирующая последовательность, формируемая генераторами случайных чисел. Однако не все кодовые последовательности, сформированные случайным набором, наилучшим образом удовлетворяют основным требованиям [1-5]:

– обеспечить максимальное соотношение между уровнем сигнала $U_{\text{с}}$ и боковых лепестков $U_{\text{б}}$, образующихся после сжатия сигнала;

– длина последовательности одинаковых квантов, обладающих одним признаком, должна быть минимальной;

– возможность использовать множество различных кодовых комбинаций в пределах от сотни до тысячи, из которого для каждого следующего зондирующего сигнала кодовая комбинация выбирается случайным образом.

Чтобы выполнить эти противоречивые требования, целесообразно оценить предельные возможности кодов и создать банк кодовых комбинаций, наилучшим образом удовлетворяющих перечисленным требованиям.

Для оценки отношения $U_с/U_б$ воспользуемся идеальным фильтром сжатия, при помощи которого сравним неподвижный на шкале времени $U_{1с}$ (t_1: $\tau_{кв}$: $t_1+T_с$) и идентичный сигнал $U_{2с}$ (t = 0: $\tau_{кв}$: t_2), сдвигаемый последовательно по шкале времени от 0 до t_2. При этом необходимо выбрать $t_1 > T_с$, а $t_2 > t_1 + 2\ T_с$.

Перемещая $U_{2с}(t)$ от $t = 0$ до $t = t_2 - T_с$, после каждого сдвига на $\tau_{кв}$ подсчитываем число совпадений знаков квантов $U_{2с}$ и $U_{1с}$, которое является выходным сигналом фильтра сжатия $U_ф$,

$$U_ф(t) = \sum_{t}^{t+T_с} (signU_{2с}(t)*\text{sign}U_{1с}(t)). \qquad (4)$$

Очевидно, что максимальное значение $U_ф$ соответствует моменту $t_с$ – времени задержки эхо-сигнала относительно зондирующего импульса, и равно числу разрядов модулирующего кода сигнала, т.е. $U_с = \max U_ф(t_с) = N_к$. Максимальное значение $U_ф$ ($t \neq t_1$) = $U_б$ принято называть уровнем боковых лепестков [1-5].

Выбор бинарного 32-х разрядного кода для КЧФМ сигнала

Предварительные исследования на примере 16-и разрядного кода показали, что лучше указанным требованиям удовлетворяют те коды, в которых не повторяются элементарные (4-х разрядные) двоичные комбинации, а именно:

$$\begin{cases} k_1(1:4) = [1-1-1\,1]; k_2(1:4) = [-1\,1-1\,1]; k_3(1:4) = [-1-1\,1\,1]; k_4(1:4) = [1-1\,1\,1]; \\ k_5(1:4) = [-1\,1\,1-1]; k_6(1:4) = [1-1\,1-1]; k_7(1:4) = [1\,1-1-1]; k_8(1:4) = [-1\,1-1-1]. \end{cases} \qquad (5)$$

Число различных 32-х разрядных кодов, составленных из k_1 - k_8 (5), определится числом перестановок $\boldsymbol{P}(8) = 40320$.

Оценим отношение $U_с/U_б$ для каждой из 40320 комбинаций и выделим те, у которых максимальное значение, например, $U_с/U_б >= 10$. Эти операции реализованы, например, в [7].

Для 32-х разрядных комбинаций, в которых максимальное число квантов с одинаковым признаком (+1 или –1) равно 4, из всех 40320 перестановок $U_с/U_б >10$ достигается в 16 кодовых комбинациях.

Допустив трёхкратное повторение признака +1 или –1 ($k_5(1:4)$ = [-1 1 1 1]; $k_6(1:4)$ = [1-1-1-1]) получим максимальное число квантов с одинаковым признаком (+1 или –1), равное 6. При этом отношение $U_с/U_б > 10$ достигается 65 раз.

Если максимальное число квантов с одинаковым признаком (+1 или –1) в отдельных случаях может достигать 7, то, например, при

$$\begin{cases} k_1(1:4) = [-1-1-1-1]; k_2(1:4) = [1-1-1-1]; k_3(1:4) = [1\,1-1-1]; k_4(1:4) = [\,1\,1\,1-1]; \\ k_5(1:4) = [1\,1\,1\,1]; k_6(1:4) = [\,-1\,1\,1\,1]; k_7(1:4) = [-1-1\,1\,1]; k_8(1:4) = [-1-1-1\,1] \end{cases} \qquad (6)$$

обеспечивается отношение Uс/Uб > 10 220 раз.

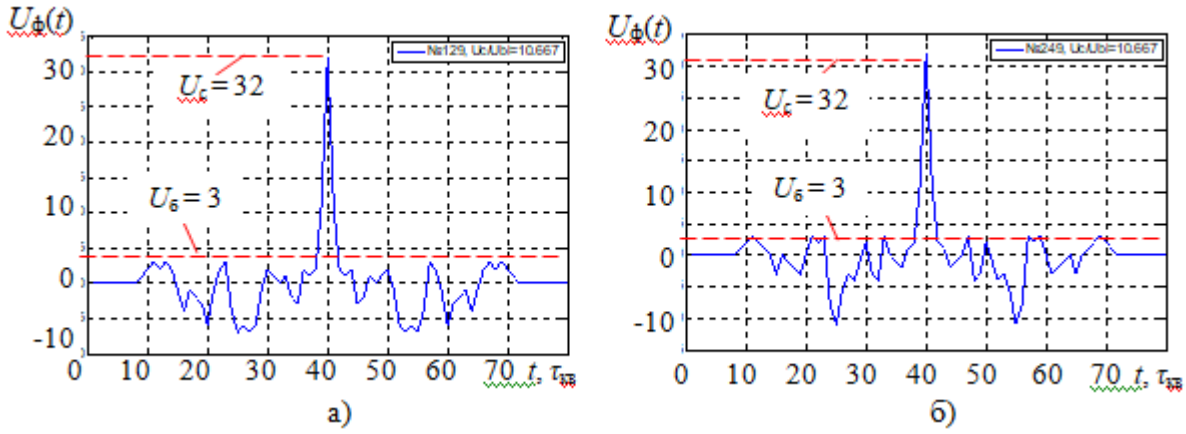


Рис. 1. Примеры выходного сигнала идеального фильтра сжатия с 32-х разрядным бинарным кодом двух вариантов, с отношением $U_с/U_б$=10,7.

Для получения сигнал $U_ф(t)$ на рис. 1,а и рис. 1,б использованы коды;

а) К(1:32) = [-1-1-11-1-1111111-111111-1-11-1-1-1111-1-1-1-1-1];

б) К(1:32) = [-1-1-11-1-111111-1111111-1-11-1-1-1-1111-1-1-1-1].

Программой [7] сформирован банк из 300 различных 32-х разрядных кодовых комбинаций – BanK32(1:300, 1:32), рекомендованных для сложных сигналов [6-10].

Выбор бинарного 128-и разрядного кода

Алгоритм синтеза 128-и разрядной кодовой последовательности аналогичен формированию 32-х разрядного кода. В качестве первичных элементов используются четыре 32-х разрядных кода из базы BanK32(1:300, 1:32).

Каждый 128-и разрядный код формируется из четырёх 32-х разрядных последовательностей так, что в центре располагается один из них – главный элемент ($К_{b1}(y,1:32)$, выбранный из BanK32(1:300,1:32). Относительно него симметрично располагаются половины (1:16, 17:32) 3-х других элементов j из $К_{b1}(j$=1:3, 1:32),

$$K128(1{:}128) = [\,K_{b1}(j=1,\ 1{:}16)\ K_{b1}(j=2,\ 1{:}16)\ K_{b1}(j=3,\ 1{:}16)$$
$$K_{b1}(y,\ 1{:}32)\ K_{b1}(j=1,\ 17{:}32)\ K_{b1}(j=2,\ 17{:}32)\ K_{b1}(j=3,\ 17{:}32)]. \qquad (7)$$

Для выбора кодов К128(1:128), обеспечивающих максимальное отношение $U_с/U_б$, необходимо перебрать все сочетания $\boldsymbol{C}(i,j)$ из i=300 по j=3, которые определяются оператором nchoosek(i=1:300, j=1:3). Например, число вариантов перебора для каждого i = 1:220 равно $i_с$ = 1:1750540, а общее число сравниваемых вариантов составляет 385118800.

Программа [7] реализует алгоритмы (7) и отбор наилучших вариантов, где достигается заданное отношение, например, $U_с/U_б$ >= 12.

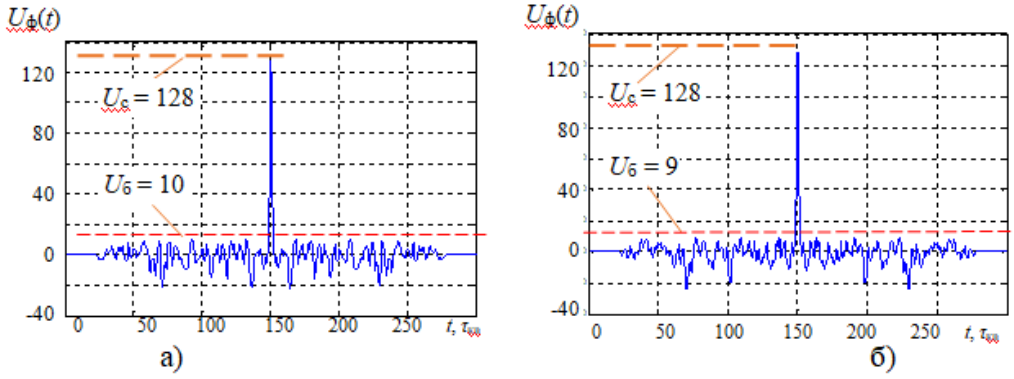


Рис. 2. Сигналы на выходе фильтра сжатия с 128-и разрядными кодами

На рис. 2,а приведены сигналы на выходе фильтра сжатия 128-и разрядного бинарного кода, обеспечивающие отношение $U_с/U_б = 12{,}8$,

К(1:128) = [-1 -1 -1 1 -1 -1 1 1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1 -1 1 -1 -1 1 1 1 1 1 -1 1 1 1 1 11 1 1 -1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 -1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 -1 1 -1 -1 -1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 -1 -1 1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1 -1 1 1 1 1 1].

На рис. 2,б – выходной сигнал фильтра сжатия с отношением $U_с/U_б = 14{,}22$,

К(1:128) = [-1 -1 -1 1 -1 -1 1 1 1 1 1 -1 1 1 1 1 1 1 1 -1 1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 1 11 1 1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 -1 -1 -1 1 1 1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 -1 -11 1 1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 -1 1 -1 -1 1 -1 -1 -1 1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 -1 1 1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1 1 1].

Приведенная методика (1) - (7) и программа [7] позволяют моделировать способы модуляции зондирующего сигнала, выбирая бинарный код квантования, обеспечивающий максимальное отношение уровня выходного сигнала фильтра сжатия к боковым лепесткам, а также различные варианты внутри квантовой модуляции, не допускающие разрывов и скачкообразных изменений сигнала.

Особенности приёма и обнаружения сложных сигналов

Упрощенная схема приёма и первичной обработки эхо-сигнала суммарного канала моноимпульсного радиолокационного визира [8, 9] показана на рис. 3, где обозначены: СРП – суммарно-разностный преобразователь с выходным сигналом суммарного канала U_Σ; F_g – частота гетеродина приёмного устройства; $F_Д$ – величина доплеровского смещения частоты F_g; УВЧ – усилитель высокой частоты; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; $\vartheta_а$, $\psi_а$ – углы поворота антенны; $\vartheta_ц$, $\psi_ц$, $D_ц$ – угловые координаты и дистанция до цели.

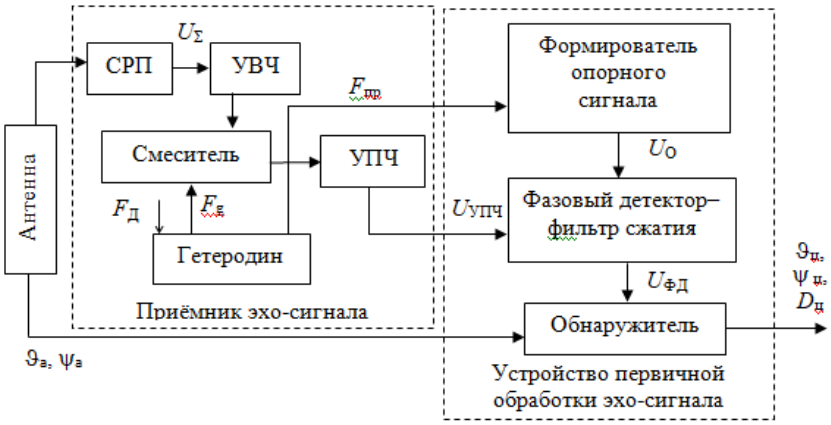


Рис. 3. Схема приёма и первичной обработки сложного эхо-сигнала

Входным сигналом устройства первичной обработки эхо-сигнала является $U_{УПЧ}$ – сигнал УПЧ, который содержит полезный сигнал $U_с$ и шум $U_ш$. В свою очередь, $U_ш$ содержит составляющие собственного шума приёмника и эхо-сигнала от фона и помех.

Для обнаружения цели используется U_Σ – сигнал суммарного канала СРП, который усиливается УВЧ, смешивается с сигналом гетеродина и поступает на вход ФД. Выходным сигналом устройства первичной обработки является факт обнаружения эхо-сигнала (цели) и время его задержки $t_с$ относительно зондирующего сигнала, определяющее дистанцию до цели $D_ц$ и угловые координаты цели $\vartheta_ц$, $\psi_ц$, соответствующие угловому положению антенны ($\vartheta_а$, $\psi_а$) в момент обнаружения эхо-сигнала.

Важно отметить, что фильтр сжатия непосредственно использует сигнал УПЧ, осуществляя сжатие эхо-сигнала в момент времени $t_с$. Такое техническое решение позволяет провести первичную обработку сложных эхо-сигналов с любым типом внутриимпульсной модуляции и внутри квантовой модуляции [1-10]. Для локатора летательного аппарата,

двигающегося с известной скоростью, доплеровское смещение несущей частоты учитывается путем смещения частоты гетеродина, сохраняя значение $F_{\text{пр}}$.

Модель бинарного фазового детектора - фильтра сжатия эхо-сигнала

Бинарный фазовый детектор сравнивает знаки опорного сигнала и сигнала приёмника. На одном входе этого устройства записана бинарная модель $U_{\text{О}}$ ожидаемого эхо-сигнала (1) - (3) и сохраняется постоянной до появления следующего зондирующего импульса. $U_{\text{О}}\left(1:\Delta t:T_{\text{с}}\right)=\text{sign}\left(U\left(1:\Delta t:T_{\text{с}}\right)\right)$, где $T_{\text{с}}$ – длительность зондирующего сигнала $U_{\text{О}}$; Δt – интервал времени, через который определяется знак сигналов $U_{\text{О}}$.

Подаваемый на второй вход фильтра сжатия сигнал с выхода УПЧ также преобразуется в дискретный бинарный сигнал с интервалом по времени Δt.

Бинарный фазовый детектор реализует алгоритм, оптимальный для рассматриваемых сигналов [1-10]

$$U_{\text{ФД}}(t)=\sum_{t}^{t+T_{\text{с}}}\left(\text{sign}(U_{\text{УПЧ}}(t:\Delta t:T_{\text{Н}}))\,\text{sign}(U_{\text{О}}(1:\Delta t:\text{t}+T_{\text{с}}))\right), \qquad (8)$$

где $U_{\text{ФД}}$ (0: Δt: $T_{\text{Н}}$) – выходной сигнал ФД размерностью 1:N, соответствующийинтервалу времени наблюдения $T_{\text{Н}}$ с дискретностью Δt.

Если реализовать алгоритм (8) на каждом шаге реального времени Δt анализа сигнала $U_{\text{УПЧ}}$, необходимо kN_k раз провести сравнение его со знаками опорного сигнала $U_{\text{О}}$ и просуммировать результат.

Для реализации фильтра сжатия формируются две составляющие опорного сигнала: синусный $U_{S1}(t)$ и косинусный $U_{C1}(t)$ сигналы единичной амплитуды на частоте $F_{\text{пр}}$.

Для учёта квадратурной составляющей частоты бинарного квантования сигнала (если интервал $\Delta t \geq \tau_{\text{кв}}/2$) формируются дополнительные опорные сигналы $U_{S2}(t)$ и $U_{C2}(t)$, путём смещения $U_{S1}(t)$ и $U_{C1}(t)$ на время, равное половине длительности кванта модуляции, $\tau_{\text{кв}}/2$.

$$U_{S2}\left(t\right)=U_{S1}\left(t+\tau_{\text{кв}}/2\right);\quad U_{C2}\left(t\right)=U_{C1}\left(t+\tau_{\text{кв}}/2\right). \qquad (9)$$

Основу фильтра сжатия составляют 4 цифровых (бинарных) фазовых детектора (ЦФД1 – ЦФД4), на каждый из которых поступает сигнал $U_{\text{УПЧ}}$ и один из перечисленных ранее сигналов $U_{S1}(t)$, $U_{C1}(t)$, $U_{S2}(t)$, $U_{C2}(t)$. Сигналы $U_{\text{Д1}S}$, $U_{\text{Д1}C}$, $U_{\text{Д2}S}$, $U_{\text{Д2}C}$ с выхода детекторов объединяются. Алгоритм работы сжатия эхо-сигнала с шагом реального времени Δt имеет вид:

$$\begin{cases} U_{\text{Д1}S}(t)=\sum_{t}^{t+T_{\text{с}}}(\text{sign}(U_{S1}(1{:}T_{\text{с}}))*\text{sign}(U_{\text{УПЧ}}(t{:}t+T_{\text{с}})));\\ U_{\text{Д1}C}(t)=\sum_{t}^{t+T_{\text{с}}}(\text{sign}(U_{C1}(1{:}T_{\text{с}}))*\text{sign}(U_{\text{УПЧ}}(t{:}t+T_{\text{с}})));\\ U_{\text{Д2}S}(t)=\sum_{t}^{t+T_{\text{с}}}(\text{sign}(U_{S2}(1{:}T_{\text{с}}))*\text{sign}(U_{\text{УПЧ}}(t{:}t+T_{\text{с}})));\\ U_{\text{Д2}C}(t)=\sum_{t}^{t+T_{\text{с}}}(\text{sign}(U_{C2}(1{:}T_{\text{с}}))*\text{sign}(U_{\text{УПЧ}}(t{:}t+T_{\text{с}})));\\ U_{\text{Д1}}(t)=\sqrt{U^2_{\text{Д1}C}(t)+U^2_{\text{Д1}S}(t)};U_{\text{Д2}}(t)=\sqrt{U^2_{\text{Д2}C}(t)+U^2_{\text{Д2}S}(t)}\\ U_{\text{ФД}}\left(t\right)=U_{\text{Д1}}\left(t\right)+U_{\text{Д2}}\left(t\right), \end{cases} \qquad (10)$$

где $U_{\text{Д1}}$ объединяет сигналы $U_{\text{Д1}C}$ и $U_{\text{Д1}S}$, $U_{\text{Д2}}$ – сигналы $U_{\text{Д2}C}$ и $U_{\text{Д2}S}$, а $U_{\text{ФД}}$ суммирует сигналы $U_{\text{Д1}}$ и $U_{\text{Д2}}$.

Выбор порога обнаружения эхо-сигнала и оценка ложной тревоги

Для обнаружения сигналов от цели в устройствах первичной обработки используются оптимальные по критерию Неймана-Пирсона обнаружители, обеспечивающие получение наибольшей вероятности правильного обнаружения ($P_{\text{п.о.}}$) при допустимой заданной вероятности ложной тревоги ($P_{\text{л.т.}}$).

Несмотря на то, что плотности распределения амплитуды сигнала и шума пересекаются, ложная тревога не наблюдается. Это объясняется тем, что значительную часть шума составляют боковые лепестки, максимальная величина которых пропорциональна амплитуде сигнала. Плотность изменения шумовых выбросов фазового детектора фильтра сжатия отличается от нормального или равномерного закона. Она зависит от конкретного кода модуляции и типа внутриквантовой модуляции сигнала.

Величина эхо-сигнала, достигающая максимального значения $U_{\text{шФД}}(t)$ шума, включающего в себя, кроме собственного шума и фона, составляющую, образованную боковыми лепестками сигнала, является порогом обнаружения $U_{\text{пор1}}$,

$$U_{пор1} \approx max U_{шФД} / (1 - \rho), \qquad (11)$$

где $\max U_{\text{щФД}}$ – максимальные значения шумовых выбросов на выходе фазового детектора, ρ – отношение максимального уровня боковых лепестков $U_{\text{БЛ}}$ к величине сигнала $U_{\text{с}}$ при отсутствии шума.

Превышение порога, $U_{\text{ФД}}(t_{\text{с}}) > U_{\text{пор1}}$, на интервале $t_{\text{с}} \pm T_{\text{с}}$ является признаком обнаружения эхо-сигнала и фиксации величины $t_{\text{с}}$, пропорциональной дистанции до отражающего объекта.

Если известны $w_{\text{ш}}(U_{\text{ФД}})$ – плотность распределения амплитуды шума на выходе ФД при фиксированном среднем уровне шума УПЧ, и $w_{\text{с}}(U_{\text{ФД}},U_{\text{сц}})$ – плотность распределения амплитуды эхо-сигнала на выходе фазового детектора, где $U_{\text{сц}}$ – среднее значение эхо-сигнала фазового детектора, определяемое энергетическим потенциалом локатора и отражательными свойствами цели, можно воспользоваться определением значения $U_{\text{пор1}}(P_{\text{л.т.}})$ по критерию Неймана-Пирсона, а именно:

$$P_{\text{л.т.}} = \int_{U_{пор1}}^{U_H} (w_{\text{ш}}(U_{\text{ФД}}) + \rho w_{\text{с}}(U_{\text{ФД}}, U_{\text{сц}}))\mathrm{d}U_{\text{ФД}},\ P_{\text{п.о.}} = \int_{U_{пор1}}^{U_H} (w_{с}(U_{\text{ФД}}), U_{\text{сц}})\mathrm{d}U_{\text{ФД}} \qquad (12)$$

где $U_{\text{Н}}$ – уровень насыщения фазового детектора (N, у.е.) или $\max U_{\text{ФД}}$, при $w_{\text{с}} \neq 0$.

Основной особенностью оценки качества обнаружения сложных эхо-сигналов ($P_{\text{л.т.}}$, $P_{\text{п.о.}}$), в отличие от простых сигналов, является необходимость совместного решения уравнений (12).

Величина порога обнаружения $U_{\text{пор1}}$ определяется равенством

$$w_{\text{с}}\left(U_{\text{сФД}} = U_{\text{пор1}}\right) = w_{\text{ш}}\left(U_{\text{шФД}} = U_{\text{пор1}}\right) + w_{\text{б.л.}}\left(U_{\text{б.л.}} = U_{\text{пор1}}\right). \qquad (13)$$

Модель обработки эхо-сигналов, реализованная в программе [8], позволяет наглядно моделировать выходной сигнал бинарного фазового детектора, определить обнаружительную способность РЛС ($P_{\text{л.т.}}$, $P_{\text{п.о.}}$) и количественно оценивать влияние на неё: качества кода модуляции сигнала (число и длительность квантов, отношение амплитуды сигнала к уровню боковых лепестков); параметров внутри квантовой модуляции и частоты анализа (опроса) принимаемого сигнала; статистических параметров шумов приёмника и боковых лепестков; погрешности значения скорости сближения летательного аппарата с целью, необходимой для компенсации доплеровского смещения частоты эхо-сигнала.

Особенности обработки пачки сложных радиолокационных сигналов

Исследование когерентного и некогерентного накопления рассматриваемых сложных сигналов (1) - (3) в режиме обзора и сопровождения цели проведено с использованием программы [9]. Используемая в ней модель накопления пачки сложных сигналов позволяет получить численные оценки зависимости отношения сигнал/шум на выходе ФД от: заданного

отношения сигнал/шум на входе ФД (на выходе УПЧ); числа отражённых сигналов от цели; числа эхо-сигналов в пачке; скорости сканирования антенны и параметрах ДНА; временного интервала опроса фазового детектора и дискретности временного квантования сигнала Δt. Указанные оценки проводятся не только в режиме поиска, но и в режиме сопровождения цели при малых угловых отклонениях линии визирования от электрической оси антенны или при известных колебаниях линии визирования в пределах ДНА.

Параметры модуляции (повышение амплитуды) на характерных частотных участках пачки спектра, обусловленные ДНА и флуктуацией мощности эхо-сигналов обнаруживаются как в спектре когерентной, так и некогерентной пачки.

Показано, что когерентное накопление пачки имеет преимущества перед некогерентным накоплением по возможностям анализа спектра пачки эхо-сигналов. Важным преимуществом спектрального анализа когерентной пачки является возможность выявления ΔF_{dp} – отличия промежуточной частоты эхо-сигналов от расчётного значения, компенсирующего доплеровский эффект сближения ЛА с целью. Обнаружение и измерение величины ΔF_{dp} может служить признаком, например, движения морской цели или наличия ошибки сопровождения цели по угловым координатам [6].

Отметим, что для оценки качества накопления эхо-сигналов и спектрального анализа, для обоснования решающих правил обнаружения целей или помех по амплитудным и частотным признакам в условиях шума и боковых лепестков эхо-сигналов необходимо иметь представительный статистический набор данных. Статистические данные во многом обеспечиваются возможностями программ для моделирования и оценки качества обработки сложных радиолокационных сигналов в среде «MatLab» [7 - 9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ч. Кук, М. Бернфельд*. Радиолокационные сигналы. Пер. с английского под ред. В. Кельзона. М.: Изд-во «Советское радио», 1971, – 568 с.

2. *М. Скольник.* Справочник по радиолокации / Перевод с английского в 4-х томах под редакцией Я.С. Ицхоки. –М.: Советское радио, 1976, т.1, –456с.

3. *Трухалёв Л.А.* Радиолокационные сигналы и их применение. – М.: Советское радио, 1976, – 446 с.

4. *Чеботарёв Д.В.* Минимизация боковых лепестков функций неопределённости фазоманипулированных сигналов в локальной области частотно-временных сдвигов. Вестник Новгородского гос. ун-та. №44, 2007, – С. 13-17.

5. *Дьяконов В.П.* MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М: ДМК Пресс, 2016. – 976 с.

6. *Шаров С.Н.* Информационные каналы систем управления: Учебное пособие. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т. 2018, – 148 с.

7. *Шаров С.Н., Соловьева В.В., Толмачев С.Г., Андриевский Б.Р.* Программа синтеза сложных радиолокационных сигналов. Свидетельство о регистрации № 2017611140. Дата гос. регистрации 05.04.2017.

8. *Шаров С.Н., Соловьева В.В., Толмачев С.Г.* Программа первичной обработки сложных радиолокационных эхо-сигналов. Свидетельство о гос. регистрации программы на ЭВМ №2017660170. Дата гос. регистрации 18.09.2017.

9. *Шаров С.Н., Соловьева В.В., Толмачев С.Г.* Программа обработки пачки сложных радиолокационных эхо-сигналов. Свидетельство о гос. регистрации программы на ЭВМ №2018660380. Дата гос. регистрации 06.07.2018.

10. *Шаров С.Н.* Синтез и обработка сложных локационных сигналов информационных каналов систем управления: Учебное пособие. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т. 2019. – 126 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-293-302

Цимбал Владимир Анатольевич, Потапов Сергей Евгеньевич, Тоискин Василий Евгеньевич

Военная академия РВСН имени Петра Великого

ПРИЛОЖЕНИЕ КОНЕЧНЫХ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ К АНАЛИЗУ И СИНТЕЗУ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Аннотация. *Исследование процессов доставки сообщений в сетях передачи данных для синтеза протоколов информационного обмена и параметров самих сетей является актуальной задачей. Предложено для анализа и синтеза сетей передачи данных применять теорию поглощающих конечных марковских цепей с использованием ситуационных двудольных графов. На основе на основе предложенного подхода приведен пример математического моделирования процесса доставки многопакетных сообщений на сеансе связи в проключенном декаметровом радиоканале передачи данных направления «точка-точка» с типовыми протоколами информационного обмена.*

Ключевые слова: *конечная марковская цепь, сеть передачи данных, вероятностно-временные характеристики, временные характеристики.*

Annotation *The research of processes of delivery of messages in data transmission networks for synthesis of protocols of information exchange and parameters of networks is a relevant task. It is offered for the analysis and synthesis of data transmission networks to apply the theory of the absorbing finite Markov chains with use of situational bipartite graphs. On a basis on the basis of the offered approach the example of mathematical model operation of process of delivery of multipackage messages on a communication session in a decameter radio channel of data transmission of the point-to-point direction with standard protocols of information exchange is given.*

Keywords: *final Markov chain, data transmission network, probabilistic and time characteristics, temporary characteristics.*

Процесс функционирования сети передачи данных (СПД) хорошо описывается конечными марковскими цепями (КМЦ). Это обусловлено следующим [1,2,3]. Во-первых, процесс доставки сообщений в СПД является случайным, что вытекает из наличия в каналах связи помех, приводящих к искажениям передаваемых бит информации. Во-вторых, физика процесса доставки сообщений в СПД подтверждает соблюдение в нем марковского свойства. В-третьих, изменение состояния данного процесса происходит в дискретные моменты времени, вызванные передачей пакета (сообщения) или квитанции. В-четвертых, количество состояний рассматриваемого процесса счетно и конечно.

Анализ СПД, как правило, нацелен на нахождение временных и вероятностно-временных характеристик (ВХ и ВВХ) доставки сообщений [1], при этом основными параметрами сети и процесса доставки являются [3,4,5]:

- топология сети («точка-точка», «точка-многоточка»);
- вид трафика и длина коммутируемой единицы информации (одно и многопакетное сообщения);
- производительность узлов коммутации, пропускная способность направлений связи и качество каналов первичной сети (по вероятности ошибки на символ);
- метод передачи (виртуальные каналы, дейтаграммный режим);
- процедура управления маршрутизацией (статистическая, динамическая);
- мерность используемых маршрутов (одно- и многомерный маршрут);

– механизм защиты от перегрузок на СПД;
– стек используемых в транспортной сети протоколов.

Синтез СПД, как правило, нацелен на нахождение таких значений ее основных параметров, которые обеспечивали бы заданные ВХ и ВВХ доставки сообщений при ограничениях, например, на стоимостные характеристики [3,4].

Первая задача требует расширения классической теории КМЦ на случай неоднородного шага переходов. Вторая задача требует наличия в теории КМЦ для вероятностей состояний функций, аналогичных известным из классической теории чувствительности функциям чувствительности. Снять эти ограничения позволяет следующий методический аппарат в виде определений, утверждений, лемм и теорем, составляющий основу теории чувствительности КМЦ [1].

Пусть имеется КМЦ с n состояниями, переходы между которыми происходят с разными шагами. Аналогично матрице переходных вероятностей $P_{[n,n]}$ для КМЦ введем матрицу шагов переходов $T_{[n,n]}$, при этом каждой переходной вероятности p_{ij} соответствует свой шаг $\tau_{ij}(i, j = \overline{1,n})$. КМЦ рассматривается в переходном режиме за L шагов. Распределение вероятностей КМЦ на нулевом шаге задано вектором $P^{(0)}_{S<n>}$, финальное распределение вероятностей - вектором $P^{(\Phi)}_{S<n>}$. Для каждого i-го состояния КМЦ вводится частный средний шаг перехода во все состояния $\tau = \sum_{j=1}^{n} p_{ij}\tau_{ij} = const$ и для всей КМЦ средний шаг перехода на текущем ℓ-м шаге $\bar{\tau}_{ш_\ell}$. Динамика вероятностей состояний КМЦ на i-м шаге описывается уравнением Колмогорова-Чепмена (УКЧ):

$$P^{(i)}_{S<n>} = P^{(0)}_{S<n>} \cdot P^{i}_{[n,n]} \tag{1}$$

Утверждение 1. Средний шаг перехода в КМЦ с разными шагами переходов является зависящим от времени, т.е. если $\tau_{ij} \neq const$, то

$$\forall \ell = \overline{0,L} \quad \exists \quad \bar{\tau}_{ш_\ell} = \sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{n} p_{ij}\tau_{ij}\right) P^{(\ell)}_{Si} \tag{2}$$

Утверждение 2. Средний шаг в КМЦ с разными шагами переходов зависит от начального распределения вероятностей состояний, т.е. если $\tau_{ij} \neq const$, то

$$\forall \ell = \overline{0,L} \quad \exists \quad \bar{\tau}_{ш_\ell} = f\left(P^{(0)}_{S<n>}\right) \tag{3}$$

Утверждение 3. Реальное среднее время за L шагов КМЦ с разными шагами переходов τ_{ij} равно

$$\forall \ell = \overline{0,L} \quad \exists \quad t_L = \sum_{\ell=1}^{L} \bar{\tau}_{ш_\ell} \tag{4}$$

Утверждение 4. Средний шаг перехода эргодической КМЦ с разными шагами переходов с течением времени стремится к постоянной величине, т.е. если $\tau_{ij} \neq const$, то

$$\lim_{\ell\to\infty} \bar{\tau}_{ш_\ell} = \sum_{i=1}^{n} \tau_i P^{(\Phi)}_{Si} \tag{5}$$

Утверждение 5. Средний шаг перехода конечной поглощающей марковской цепи с разными шагами переходов с течением времени стремится к шагу перехода поглощающего состояния, т.е. если $\tau_{ij} \neq const$, то

$$\lim_{\ell\to\infty} \bar{\tau}_{ш_\ell} = \tau_{nn} \tag{6}$$

Утверждение 6. Среднее время перехода КМЦ из состояния i в состояние j при разных шагах переходов равно

$$\forall\, i, j = \overline{1,n} \quad \exists \quad M[t] = \sum_{k=i}^{j-1} M[S_k]\,\tau_k \tag{7}$$

где $M[S_k]$ - среднее число шагов, проводимых процессом в k-м сообщающемся состоянии;
τ_k - частный средний шаг перехода для k-го состояния.

Утверждение 7. Дисперсия времени перехода КМЦ из состояния i в состояние j при разных шагах переходов равна

$$\forall\, i, j = \overline{1,n} \quad \exists \quad D[t] = \sum_{k=i}^{j-1} D[S_k]\,\tau_k^2 \tag{8}$$

где $D[S_k]$ - дисперсия числа шагов, проводимых процессом в k-м состоянии.

Важным инструментом оптимального синтеза объектов, описываемых дифференциальными или алгебраическими уравнениями, являются введенные Томовичем Р., Вукобратовичем М. и развитые Розенвассером Е.Н. и Юсуповым Р.М. функции чувствительности. Однако для объектов, описываемых КМЦ, подобной методической базы нет. Здесь предлагается оценивать чувствительность КМЦ введенными матрицами частной, неполной и полной чувствительности. При этом вводится совокупность определений, на основе которых формулируются и доказываются утверждения, леммы и теоремы. Основой метода оценивания чувствительности характеристик КМЦ к компонентам матрицы переходных вероятностей является переходный режим КМЦ, при этом рассматривается КМЦ с (n+1) состоянием.

Определение 1. Переходным режимом КМЦ называется этап изменения вероятностей всех ее состояний от числа шагов или от времени.

Определение 2. Установившимся или стационарным режимом КМЦ называется этап, в течение которого изменения вероятностей всех ее состояний от числа шагов или времени не происходит.

Определение 3. Чувствительностью КМЦ будем называть упорядоченную степень влияния ее ненулевых переходных вероятностей p_{ij} на степень изменения вероятностей ее состояний P_{Sj}.

Определение 4. Частной чувствительностью КМЦ называется упорядоченная степень влияния ее ненулевых переходных вероятностей p_{ij} на изменение вероятности конкретного состояния P_{Si}.

Из данного определения следует, что у КМЦ имеется как минимум (n+1) частная чувствительность.

Определение 5. Полной чувствительностью КМЦ называется упорядоченная степень влияния ее ненулевых переходных вероятностей p_{ij} на изменение всей совокупности вероятностей ее состояний $P_{S<n+1>}$.

Определение 6. Неполной чувствительностью КМЦ называется упорядоченная степень влияния ее ненулевых переходных вероятностей p_{ij} на изменение некоторой неполной совокупности вероятностей ее состояний $P_{S<m>}$, где $m < (n+1)$.

Определение 7. КМЦ называется помеченной, если какой-либо отличный от нуля элемент ее матрицы переходных вероятностей "помечен" существенно отличным от других шагом переходов.

Утверждение 8. Количество вариантов вектора исходных вероятностей состояний КМЦ по крайней мере не меньше числа состояний цепи.

Утверждение 9. Число шагов переходного режима КМЦ по крайней мере не меньше числа состояний цепи.

Лемма 1. Для переходного режима помеченной КМЦ с единичными шагами за L шагов процесса для вероятностей всех состояний существует свое подмножество средних шагов $M[z,k]$, существенно выделяющихся по величине и обусловленных только помеченной переходной вероятностью p_{zk}.

Лемма 2. Для вероятности каждого состояния любой КМЦ при заданном векторе исходных вероятностей состояний существует единственная переходная вероятность, доставляющая в переходном режиме максимум суммарного изменения вероятности данного состояния, т.е.

$$\forall\ P_{Si}\left(i=\overline{0,n}\right)\quad \exists\quad p_{zk}=\arg\max_{\left(z,k=\overline{0,n}\right)}\sum\Delta P_{Si}^{\left(m^{[z,k]}\right)} \tag{9}$$

Лемма 3. Для вероятностей всех состояний любой КМЦ при заданном векторе исходных вероятностей состояний существует единственная переходная вероятность, доставляющая в переходном режиме общий максимум времени изменения вероятностей всех состояния, т.е.

$$\forall\ P_{Si}\left(i=\overline{0,n}\right)\quad \exists\quad p_{zk}=\arg\max_{\left(z,k=\overline{0,n}\right)}T^{[z,k]} \tag{10}$$

Определение 8. Частная чувствительность КМЦ при заданном векторе исходных вероятностей состояний выражается матрицей частной чувствительности $R^{(i)}_{[n+1,\,n+1]}$, каждый ненулевой элемент которой представляет собой ранг (номер) (не путать с рангом матрицы!) степени влияния соответствующей переходной вероятности на вероятность анализируемого состояния.

Таким образом, матрица частной чувствительности КМЦ относительно i-го ее состояния при заданном векторе исходных вероятностей состояний имеет вид

$$R^{(i)}_{[n+1,\,n+1]}=\begin{vmatrix} r^{(i)}_{00}\ldots r^{(i)}_{0j}\ldots r^{(i)}_{0n}\\ r^{(i)}_{i0}\ldots r^{(i)}_{ij}\ldots r^{(i)}_{in}\\ r^{(i)}_{n0}\ldots r^{(i)}_{nj}\ldots r^{(i)}_{nn}\end{vmatrix} \tag{11}$$

Теорема 1 (способ Δ-вероятностей). Матрица частной чувствительности КМЦ однозначно определяется через матрицу Δ-вероятностей, т.е.

$$\forall\ P_{Si}\left(i=\overline{0,n}\right)\quad \exists\quad R^{(i)}_{[n+1,\,n+1]}=f\left(\Delta_{i\,[n+1,\,n+1]}\right) \tag{12}$$

Отметим, что для любого состояния КМЦ существует (n+1) матрица частной чувствительности, каждая из которых обусловлена своим вектором исходных вероятностей, а для всей КМЦ существует $(n+1)^2$ матриц частной чувствительности. Последнее дает возможность найти полную и неполную чувствительности КМЦ.

Определение 9. Полная чувствительность КМЦ не зависит от вектора исходных вероятностей состояний и выражается матрицей полной чувствительности $R^{n}_{[n+1,\,n+1]}$, каждый ненулевой элемент которой представляет собой ранг (номер) степени влияния соответствующей переходной вероятности на вероятности всех состояний КМЦ.

Теорема 2. Матрица полной чувствительности КМЦ однозначно определяется $(n+1)^2$ матрицами Δ-вероятностей, т.е.

$$\forall\ P^{(0)}_{S<n+1>}\ \exists\ \ R^{n}_{[n+1,\,n+1]}=f\left(\Delta_{i\,j}\right),\quad \left(i,j=\overline{0,n}\right) \tag{13}$$

Теорема 3. Матрицы полной чувствительности КМЦ однозначно определяется $(n+1)$ матрицей времен, т.е.

$$\forall\ P^{(0)}_{S<n+1>}\ \exists\ \ R^{n}_{[n+1,\,n+1]}=f\left(T_{Sj}\right),\quad \left(j=\overline{0,n}\right) \tag{14}$$

Определение 10. Неполная чувствительность КМЦ не зависит от вектора исходных вероятностей состояний и выражается матрицей неполной чувствительности $R^{\bar{n}}_{[n+1,\,n+1]}$, каждый ненулевой элемент которой представляет собой ранг (номер) влияния соответствующей переходной вероятности на некоторую неполную совокупность вероятностей ее состояний.

Теорема 4. Если количество учитываемых состояний КМЦ $m<n+1$, то матрица неполной чувствительности КМЦ однозначно определяется $m\,(n+1)$ матрицами Δ-вероятностей

$$\forall\, P_{S<m>}\ \exists\ \ \bar{R}^{n}_{[n+1,\,n+1]} = f\left(\Delta_{ij}\right),\quad \left(j=\overline{1,m}\right) \tag{15}$$

Утверждение 10. Если минимальной из всех переходных вероятностей является $p_{zk_{\min}}$, то величина шага переходов помеченной КМЦ выбирается из условия $C>100/\,p_{zk_{\min}}$.

Разработанный метод анализа чувствительности КМЦ можно применить и к анализу чувствительности марковских процессов с непрерывным временем. При этом искомый марковский процесс необходимо заменить вложенной КМЦ, которая по свойству марковости будет адекватно отражать поведение исходного непрерывного процесса, но только в дискретные моменты времени, отстоящие друг от друга на шаг перехода $\tau_ш$. В этом случае все интенсивности переходов λ_{ij} заменяются на переходные вероятности по правилу

$$pij = 1 - exp\,(-\lambda ij\ \tau ш\,), \tag{16}$$

где $i, j = \overline{0,n}$, $(n+1)$ - общее число состояний анализируемого процесса.

Переходная вероятность p_{ij} находится из выражения

$$p_{ij} = 1 - \sum_{j=0}^{n} p_{ij}\ ,\quad \left(i, j = \overline{0,n}\ ,\ i \neq j\right). \tag{17}$$

Теперь к полученной КМЦ возможно применить разработанный ранее метод анализа чувствительности. Учитывая, что структуры матрицы интенсивностей и матрицы переходных вероятностей вложенной КМЦ одинаковы, по найденным матрицам чувствительности несложно определить те интенсивности, к которым в наибольшей степени чувствительны вероятности анализируемых состояний процесса в переходном режиме. Последнее дает возможность вводить, например, систему приоритетов для неординарных информационных потоков [1-5].

Рассмотрим пример применения предложенного научно-методического аппарата, для математического моделирования доставки многопакетных сообщений на сеансе связи в проключенном декаметровом радиоканале передачи данных направления «точка-точка» с типовыми протоколами ИО для получения вероятностно-временных (ВВХ) и временных характеристик (ВХ) процесса информационного обмена

Рассмотрим процесс функционирования типовых протоколов, под которыми будем понимать протоколы, обеспечивающие достоверность передачи информации за счет квитирования полученных пакетов, а также имеющие возможность регулирования интенсивности выдачи пакетов на передачу за счет использования механизмов управления (например «скользящего окна» [5]).

Исследуемые протоколы работают по своим алгоритмам и во многом отличаются друг от друга. Однако анализ показывает, что можно выделить состояния процесса передачи информации, свойственные всем протоколам. К таким состояниям относятся: передача пакета отправителем, его получение на приемной стороне, отправка соответствующей квитанции получателем пакета и её получение на передающей стороне. Также общим является тот факт, что процесс доставки пакетов и квитанций есть случайный процесс, так как при передаче информации по декаметровым каналам имеется ряд факторов [6], вызывающих битовые ошибки в пакетах и квитанциях, что в свою очередь влечет повторы их передачи. При этом число состояний процесса ИО конечно, так как конечно число передаваемых пакетов, квитанций и их повторов. Время передачи информации можно разделить на отрезки, определяемые дискретными моментами передачи пакетов и квитанций. При этом соблюдается основное марковское свойство: переход процесса из текущего состояния в какие-либо другие зависит только от этого состояния и не зависит от того, как процесс в это состояние пришел. Следовательно, имеется возможность осуществить моделирование процесса доставки многопакетных сообщений на сеансе связи в проключенном декаметровом радиоканале

передачи данных направления «точка-точка» с типовыми протоколами информационного обмена с использованием предложенного в данной работе подхода.

Известно [1,6,7], что ВВХ и ВХ можно получить только при условии синтеза матрицы переходных вероятностей (МПВ) для конкретных исходных данных. Тогда появляется следующая подзадача – разработка правил автоматизированного синтеза МПВ. Для решения данной подзадачи рассмотрим процесс ИО для нескольких вариантов исходных данных, необходимых для построения МПВ. К таким данным относится: количество передаваемых пакетов - u, размер «скользящего окна» - u_{sk}, количество возможных повторов - g.

Рассмотрим ситуацию, когда не применяется процедура «скользящее окно» (u_{sk}=0), сообщение состоит из двух пакетов (u=2), а возможное количество повторов каждого кадра равно одному (g=1). Для данной ситуации граф состояний и переходов представлен на рисунке 1.

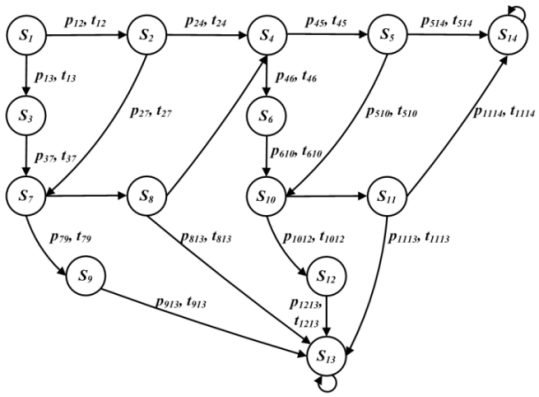


Рисунок 1 - Граф состояний и переходов для ситуации u=2, u_{sk}=0, g=1

Состояния графа, изображенного на рисунке 1, следующие: S_1 – отправитель передал первый пакет получателю; S_2 – получатель принял первый пакет и отправил в ответ квитанцию; S_4 – отправитель после получения квитанции за первый пакет выдал второй пакет; S_5 – получатель принял второй пакет и выдал в ответ квитанцию; S_7 – отправитель при неполучении квитанции за первый пакет выдал его повтор; S_8 – получатель принял повтор первого пакета и выдал в ответ квитанцию; S_{10} – отправитель при неполучении квитанции за второй пакет выдал его повтор; S_{11} – получатель принял повтор второго пакета и выдала в ответ квитанцию; S_3, S_6, S_9, S_{12} – фиктивное состояния, необходимые для расчета реального времени доведения МПС [1]; S_{13} - отправитель квитанции не получил, сообщение не передано; S_{14} - отправитель квитанцию получил, передача сообщения завершена успешно.

Отметим, что фиктивные состояния S_3, S_6, S_9 и S_{12} предназначены для расчета реального времени доведения сообщений [1], а вероятности перехода из них в последующие состояния определяются так: $p_{37} = p_{610} = p_{913} = p_{1213} = 1$.

Тогда МПВ для рассматриваемой ситуации будет иметь вид:

$$\mathbf{P}_{[14,14]}=\begin{bmatrix}
0 & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & p_{24} & 0 & 0 & p_{27} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{37} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & p_{45} & p_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{510} & 0 & 0 & 0 & p_{14} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{610} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{78} & p_{79} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & p_{84} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{813} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{913} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1011} & p_{1012} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1113} & p_{1114} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1213} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1414} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{1414}
\end{bmatrix} \qquad (18)$$

Переходные вероятности матрицы (18) находятся из физики процесса и зависят от вероятностей доведения пакетов и квитанций, которые определяются так:

$$p_k = (1-p_0)^{L_k},\ p_{kv} = (1-p_0)^{L_{kv}} \qquad (19)$$

где: L_k – длина пакета, L_{kv} – длина квитанции.

Известно [1], что для определения реального времени доведения сообщений необходимо воспользоваться матрицей шагов переходов (МШП), которая имеет такую же структуру, что и матрица (18). При этом элементы МШП находятся из выражений:

$$t_{12}=t_{13}=t_{45}=t_{46}=t_{78}=t_{79}=t_{1011}=t_{1012}=t_k=\frac{L_k}{V_i},$$

$$t_{24}=t_{27}=t_{514}=t_{510}=t_{84}=t_{813}=t_{1113}=t_{1114}=t_{kv}=\frac{L_{kv}}{V_i}, \qquad (3)$$

$$t_{1313}=t_{1414}=t_к+t_{кв},$$

где: t_k – время передачи пакета, t_{kv} – время передачи квитанции.

Рассмотрим ещё одну ситуацию ИО, когда сообщение состоит из трех пакетов (u=3), «скользящее окно» равно трем пакетам (u_{sk}=3), а возможное количество повторов каждого кадра также равно одному (g=1). Граф состояний и переходов для данной ситуации представлен на рисунке 2.

МПВ и МШП для данной ситуации строится аналогично выражению (18).

Анализ ситуаций ИО для различных исходных данных показывает, что с увеличением числа пакетов в сообщении, количества возможных повторов передачи одного пакета и количества пакетов в «скользящем окне» граф состояний и переходов существенно усложняется, а МПВ значительно увеличивается. Однако в более сложных графах имеются сегменты, которые неизменны относительно более простых графов. Этот факт позволил на основе метода математической индукции разработать следующий алгоритм автоматизированного синтеза МПВ.

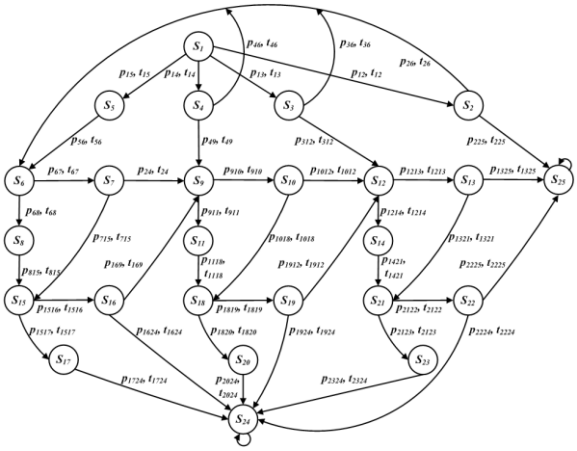


Рисунок 2 - Граф состояний и переходов для ситуации u=3, u_{sk}=3, g=1

Задача синтеза элементов МПВ включает в себя задачу нахождения индексов переходных вероятностей. Для этого необходимо знать число состояний процесса передачи, которое в зависимости от u, u_{sk}, и g равно: $N=3ug+u_{sk}+4$. Тогда правила автоматизированного синтеза МПВ следующие.

Правило 1. Состояния графа ПКМЦ нумеруются «сверху-вниз» и «справа-налево» по горизонтальным блокам, за поглощающим состоянием «сообщение не доставлено» закрепляется предпоследний номер, за поглощающим состоянием «сообщение доставлено» - последний номер. Количество блоков определяется количеством пакетов в сообщении, количество горизонтальных уровней определяется количеством повторов одного пакета с учетом уровня, описывающего алгоритм «скользящего окна». Для синтеза МПВ используем параметры i и j.

Правило 2. $p_{i,j+1} = p_s$, при $i = 2,\ 2 \le j \le N*2-1,\ s = 1...u_{sk}$;

Правило 3. $p_{i+3,j+3} = p_k$, при $1 \le i \le N-4,\ 2 \le j \le N-3$;

Правило 4. $p_{i+2,j+2} = q_k$, при $1 \le i \le N-3;\ 3 \le j \le N-2$;

Правило 5. $p_{i+2,j} = p_{kv}$, при $1 \le i \le N-3;\ 2(uq+1) \le j \le 2(ug+1)-1$, при $1 \le q \le g$;

Правило 6. $p_{i+2,j+2} = q_{kv}$, при $2 \le i \le N-2,\ 3 \le j \le 2(ug+1)-1$, при $1 \le q \le g$;

Правило 7. $p_{3i,3j+1} = 1$, при $1 \le i \le N-2,\ 1 \le j \le N-2$;

Правило 8. $p_{i,j} = 1$, при $i = j = N-1$;

Правило 9. $p_{i,j} = 1$, при $i = j = N$.

Остальные элементы матрицы равны нулю.

Правила автоматизированного синтеза МШП формируются аналогичным образом, основываясь на физике процесса.

Таким образом, с использованием полученных правил МПВ и МШП формируются для различных исходных данных, что позволяет применять предложенный научно-методический аппарат для определения ВВХ и ВХ процесса информационного обмена многопакетных сообщений на сеансе связи в проключенном декаметровом радиоканале передачи данных направления «точка-точка» с типовыми протоколами.

При этом ВВХ определяется с использованием уравнения (1), а определение ВХ (математического ожидания, дисперсии и среднеквадратического отклонения среднего времени доведения сообщения) происходит на основе фундаментальной (20) и дисперсионной (21) матриц [1]:

$$\mathbf{N}_{[n-r;n-r]} = \left(\mathbf{I}-\mathbf{Q}\right)^{-1} \qquad (5)$$

$$\mathbf{N}_{D[n-r;n-r]} = \mathbf{N}_{[n-r;n-r]} \cdot \left(2 \cdot \mathbf{N}_{dg[n-r;n-r]} - \mathbf{I}\right) - \mathbf{N}_{sq[n-r;n-r]} \quad (6)$$

с учетом выражений (2) – (8).

Проведем исследование процесса ИО многопакетными сообщениями на сеансе связи в проключенном декаметровом радиоканале передачи данных направления «точка-точка» с типовыми протоколами с использованием полученной математической модели.

Известно [7], что в протоколах ИО в декаметровых радиосетях требования по ВВХ обеспечивается при помощи механизма «скользящего окна» и повторной передачи в случае искажения какого-либо пакета. При этом применяется служебная информация в виде заголовков. Так как исследованию подлежит соединение «точка-точка», данную протокольную избыточность можно минимизировать.

Из анализа [7] следует, что необходимой и достаточной служебной информацией в пакете является: маркер начала пакета, номер пакета и контрольная последовательность пакета (CRC). Для квитанции такая информация следующая: маркер начала квитанции и маркер её окончания, поле управления (8 бит), состоящее из номера пакета (7 бит) и признака доведения (1 бит), контрольная последовательность квитанции (CRC).

Тогда под типовыми исходными данными будем понимать – длина пакета L_p= 128 бит, длина квитанции L_{kv} =56 бит. Исследование проведем при скоростях передачи информации от 600 бит/с до 4800 бит/с, как в прямом так и в обратном каналах, при вероятности битовой ошибки в них p_0=10^{-3}. По результатам проведенных расчетов построен график зависимости времени доведения сообщений от скорости передачи информации в прямом и обратном радиоканалах (рисунок 3).

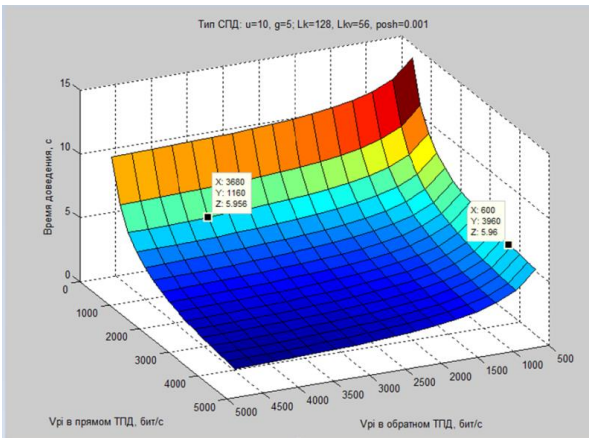


Рисунок 3 - Трехмерный график зависимости времени доведения многопакетных сообщений от скорости передачи информации в прямом и обратном радиоканалах

По данному графику можно определить оптимальные скоростные параметры. Например, время, требуемое для доставки, будет равно 6 с. Соответственно, из множества полученных значений мы можем выделить два наиболее подходящих нам результата:

1. $V_{пр}$=*1160 бит/с,* $V_{обр}$=*3680 бит/с;*
2. $V_{пр}$=*3960 бит/с,* $V_{обр}$=*600 бит/с.*

Таким образом, разработана математическая модель доставки многопакетных сообщений на сеансе связи в проключенном декаметровом радиоканале передачи данных направления «точка-точка» с типовыми протоколами ИО, позволяющая определять ВВХ и ВХ исследуемого процесса в широком диапазоне исходных данных. В результате применения данной математической модели для каждого конкретного случая можно получить оптимальные скоростные параметры за счет соответствующей настройки протокола ИО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход : монография / М.: Вузовская книга, 2014. – 144 с.: ил.

2. Цимбал В.А., Шиманов С.Н., Тоискин В.Е. Нахождение характеристик конечных марковских цепей при произвольных шагах переходов // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 9-2 (40). С. 110-113.

3. Цимбал В.А., Тоискин В.Е. Применение объектно-ориентированных графов поглощающих конечных марковских цепей для оценки качества функционирования телекоммуникационных протоколов / В сборнике: Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники. Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. 2016. С. 332-336.

4. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Лягин М.А. Оптимизация сеансовых параметров протокола информационного обмена по многоканальному дуплексному соединению "точка-точка", обеспечивающего заданную оперативность информационного обмена // В сборнике: Технологии информационного общества. XI Международная отраслевая научно-техническая конференция: сборник трудов. 2017. С. 346-347.

5. Тоискин В.Е. Моделирование механизма "скользящее окно" в протоколах информационного обмена абонентов современных сетей // В сборнике: Технологии информационного общества. X Международная отраслевая научно-техническая конференция: сборник трудов. 2016. С. 71.

6. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия - Телеком, 2006. 598 с.

7. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Лягин М.А. Нахождение границ применимости протокола типа X.25 с кумулятивной квитанцией в асимметричном радиотракте передачи данных при требуемой достоверности и оперативности доставки многопакетного сообщения // Фундаментальные исследования. 2017. № 12-1. С. 143-148.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-303-307

Обухов Павел Серафимович, Ивлиев Евгений Андревич, Ивлиев Виктор Андреевич

Донской государственный технический университет

СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИИ О БАГАЖЕ В АЭРОПОРТУ

Аннотация: *В данной статье предложена система интерактивной помощи пассажирам в аэропорту при выдачи багажа. Приведена функциональная схема системы. Разработан алгоритм программы, выполняющий идентификацию цифробуквенной информации с багажной бирки средствами библиотеки компьютерного зрения OpenCV и классификации данной информации нейронной сетью. Разработано устройство управления светодиодными матрицами, отвечающими за визуализацию информации, а также устройство синхронизации движения багажа на ленте транспортера и информации на светодиодных матрицах.*

Ключевые слова: *компьютерное зрение, штрих-код, нейронная сеть , OpenCV, Python, светодиодная матрица.*

Abstract: *This article proposes a system of interactive assistance to passengers at the airport when issuing baggage. The functional scheme of the system is given. A program algorithm has been developed that performs identification of alphanumeric information from a baggage tag by means of the OpenCV computer vision library and the classification of this information by a neural network. A control device for LED matrices that are responsible for visualizing information and a device for synchronizing baggage movement on a conveyor belt and information on LED matrices have been developed*

Keywords: *computer vision, barcode, neural network, OpenCV, Python, LED matrix.*

Введение.

В настоящее время в аэропортах существуют проблемы в сортировочных центрах и местах выдачи багажа пассажирам, так как нет простых методов автоматизации этого процесса, обеспечивающих комфорт для пассажиров. Данную проблему можно решать различными способами. Наиболее наглядным и удобным методом является идентификация цифробуквенной информации с помощью компьютерного зрения и интерактивной визуализации информации с багажной бирки. Функциональная схема система представлена на рисунке 1. Где можно видеть следующее: камера получает изображение, передает это изображение на ПК, ПК обрабатывает данное изображение, обработанную информацию передает на преобразователь USB-UART, так как в современных ПК отсутствует COM-порт. Микроконтроллер MCU1 принимает информацию по протоколу UART, обрабатывает данные с энкодера, преобразует данные энкодера в скорость, из этих данных микроконтроллер должен формировать таблицу «номер багажа» - «положение на конвейерной ленте», и по протоколу UART передавать на микроконтроллеры MCU2 – MCUn, каждый из этих микроконтроллеров отвечает за визуализацию на определенном участке ленты транспортера.

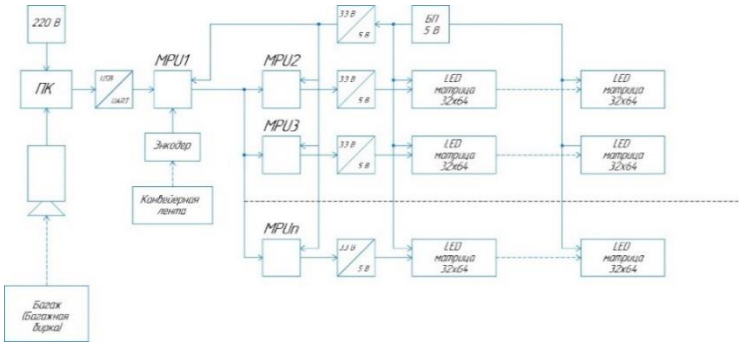


Рисунок 1 – Функциональная схема системы

Идентификация цифробуквенной информации с багажной бирки.

Для детектирования цифробуквенной информации на багажных бирках используется высокоуровневый язык программирования Python. Для реализации алгоритмов использовались функции библиотеки «OpenCV».

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) — библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом. Может свободно использоваться в академических и коммерческих целях [1].

Одной из важнейших задач для поиска информа-ции о номере рейса, является поиск штрих-кода, к которому привязывается эта информация. Зачатую информация о рейсе располагается над или под штрих кодом. Поиск штрих-кода осуществляется согласно следующей методологии:

1. Захват видеопотока с камеры, рисунок 2.а.
2. Преобразование изображения в оттенки серого функцией, рисунок 2.б.
3. Используя оператор Собеля, вычисляем величину градиента по осям X и Y.
4. Вычитание y-градиента из x-градиента, рисунок 2.в.
5. Приводим изображение в 8-битному используя функцию *convertScaleAbs(),* рисунок 2.г.
6. Размытие изображения функцией *blur(),* рисунок 2.д.
7. Бинаризация изображения используя функцию *threshold().* Каждый пиксель изображения со значением меньше 225 обращается в 0 (чёрный), а остальные — в 255 (белый), рисунок 2.е.
8. Полученное изображение является неприемлемым, так как в области штрих-кодов имеется пространство, которое нужно перекрыть для точного определения области штрих-кода. Используя функцию *getStructuringElement()* создаем прямоугольное ядро для морфологической функции *morphologyEx(),* которая использует это ядро для перекрытия черных пробелов, рисунок 2.ё.
9. Применяем функцию *erode()* для удаления белых точек, рисунок 2.ж.
10. Применяем функцию *dilate(),* так как после функции *erode()* уменьшились крупные белые области, рисунок 2.з.

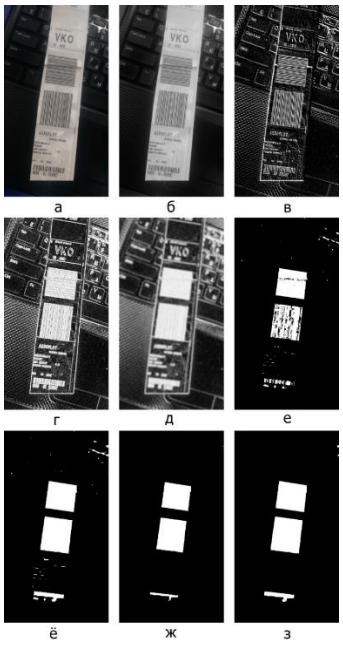


Рисунок 2 – поиск местоположения штрих-кода

Второй немаловажной задачей для распознавания цифробуквенной информации является правильное позиционирование бирки, которое осуществляется следующим образом:

1. На исходном изображении ищем все контуры, используя функцию *findContours*()
2. Зная, что на одной бирке может быть максимум 3 штрих-кода, выполняем сортировку по площади контура и размечаем прямоугольной областью первые 3 контура, рисунок 2.а.
3. Выполняем поиск наименьшей прямоугольной области, в которую можно заключить область штрих-кода используя функцию *minAreaRect()*, рисунок 3.б.
4. Вычисляем угол между полученными прямоугольными областями.
5. Выполняем афинское преобразование используя функцию *warpAffine()*, рисунок 3.в.

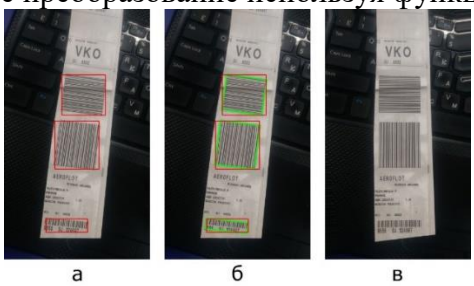


Рисунок 3 – Этапы правильного позиционирования штрихкода

После правильного позиционирования выполняется работа по поиску цифробуквенной информации.

1. Получив область местоположения штрих-кода, выполняется захват области расположенной над штрих-кодом.
2. Нахождение контуров, используя функцию *findContours*(), рисунок 4.а
3. Чтобы исключить ложное распознавание, выполняется фильтрация по размерам контуров, т.е. ширина и высота контура должны пропорционально равны размерам буквы или цифры, рисунок 4.б.

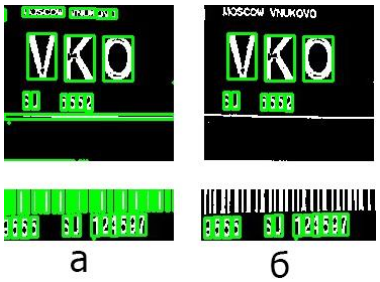


Рисунок 4 – Визуализация поиска и сортировки контуров

Классификация информации в отсортированных контурах осуществляется нейронной сетью. Для разработки нейронной сети использовался фреймворк TensorFlow, а именно встроенная библиотека Keras.

Для обучения нейронной сети была создана база из 76159 монохромных изображений цифр и букв разных шрифтов.

Так как нейросеть работает с числами в диапазоне от 0 до 1, требуется нормализация, т.е. цвет пикселей монохромного изображения масштабировать с диапазона [0; 255] в [0; 1].

Архитектура нейронной сети обладает следующими параметрами:

– Входной слой - 784 нейрона, так как размер входных изображений 28x28 пикселей;
– 3 скрытых слоя по 512 нейронов;
– Выходной слой - 35 нейронов, где каждый нейрон отвечает за прогнозирование того или иного символа.

В результате обучения нейронной сети на 10 эпохах точность составила 95,88%.

Для получения информации о символе, заключенном в контур следуем следующему алгоритму:

1. Обрезаем изображение по контуру;
2. Приводим изображение к размеру 28x28;
3. Пропускаем через нейросеть;
4. На выходе получаем массив из вероятностей;
5. Поиск номера нейрона с наибольшей вероятностью и простановка символа над контуром соответствующего этому номеру.

Работа выше описанных алгоритмов и нейронной сети на разных входных данных представлена на рисунке 5.

Рисунок 5. - Результат работы итогового алгоритма.

Синхронизация и визуализация информации.

Для задачи синхронизации в разрабатываемой системе было решено использовать оптические энкодеры так, как они обеспечивают очень высокое разрешение и точность, а также превосходные динамические характеристики, и подходят для использования в зонах с интенсивными магнитными полями. В качестве счетного устройства для энкодера и обработчика информации пришедшей по UART, используется микроконтроллер фирмы STMicroelectronics-

STM32F103C8T6, так как на борту этого контроллера имеются таймеры с функцией обработки энкодера, при использовании одного из этих таймеров не будет затрачиваться время основной программы на обработку энкодера[3].

В качестве средства визуализации используется полноцветные светодиодные матрицы с разрешением 64x32. Для организации системы управления светодиодными матрицами также используется STM32F103C8T6, так как обладает высокой частотой, что требуется для динамической индикации светодиодными матрицами и быстрого обновления информации в сдвиговых регистрах.

Матрица принимает данные через входной разъём «DATA IN» с интерфейсом «HUB-75», а через разъем «DATA OUT» информация передается на следующую последовательно подключенную матрицу.

Управление данным типом матриц является динамическим, т.е. одновременно светится только одна строка каждого блока. Выбор строки осуществляется сигнальными выводами A, B, C, D. Данные в каждую строку поступают через сигнальные выводы R1, G1 и B1 для верхнего блок светодиодной матрицы, и через R2, G2, B2 для нижнего. Низким импульсом вывода CLK пропихиваются в сдвиговом регистре, сигналом LAT сигнализируется, чтобы сдвиговый регистр принял строку данных, выводом OE информация с регистров отображается.

Программа микроконтроллера работает по следующему алгоритму:

1. Прием данных по UART с устройства синхронизации.
2. Преобразование численной информации о номере в графическую
3. Пиксельный перенос графической информации в нужное положение на массив отображения.
4. Построчная запись массива отображения в сдвиговые регистры.
5. Отображение данных с регистров на светодиодной матрице, рисунок 6.

Рисунок 6. – Визуализация информации на светодиодных матрицах

Заключение.

В ходе выполнения данной работы были разработаны алгоритмы: быстрой локализации штрих-кодов, правильного позиционирования багажной бирки, локализации и распознавания цифробуквенной информации на языке Python с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Создана нейронная сеть классификации цифробуквенной информации с точностью 95,88%. Разработано устройство визуализации информации о багаже на полноцветных светодиодных матрицах, установленных вдоль конвейерной ленты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт библиотеки OpenCV. URL: http://opencv.org (дата обращения: 05.09.2018).
2. Rosebrock, A. Detecting Barcodes in Images with Python and OpenCV [Electronic resource] / A. Rosebrock // Pyimagesearch. − 2014. − Режим доступа : https://www.pyimagesearch.com/2014/11/24/detecting-barcodes-images-python-opencv/.
3. Cortex-M3 Technical reference manual, ARM ® Ltd / STMicroelectronics – Электрон. Дан. – режим доступа: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/59/b9/ba/7f/11/af/43/d5/CD00171190.pdf/files/CD00171190.pdf/jcr:content/translations/en.CD00171190.pdf

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-308-314

Клименко Ирина Сергеевна

Институт сервиса, туризма и дизайна

МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ОБЪЕКТА ИНФОРМАТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Аннотация. *Целью настоящего исследования является анализ современных интеллектуальных систем обеспечения информационной безопасности объекта, разработка алгоритма численной оценки степени защищенности и эффективности механизмов управления защитой информации. Предлагается использование метода экспертных оценок для решения задачи обеспечения требуемого уровня информационной безопасности объекта. Рассматриваются модели управления защитой информации в условиях неопределенности с использованием интеллектуальной поддержки принятия решений.*

Ключевые слова: *экспертная оценка, интеллектуальная информационно управляющая система, критериальный выбор.*

Abstract. *The purpose of this study is to analyze the modern intelligent information security systems of an object, to develop an algorithm for the numerical evaluation of the degree of protection and the effectiveness of information security management mechanisms. It is proposed to use the method of expert assessments to solve the problem of ensuring the required level of information security of an object. The models of information security management in the conditions of uncertainty with the use of intelligent decision support are considered.*

Keywords: *expert assessment, intelligent information management system, criteria selection.*

Современное состояние комплексной защиты инфокоммуникационных объектов требует разработки и применения эффективных механизмов защиты от несанкционированного доступа к информационным активам разной природы, что обуславливает необходимость интеллектуализации систем обеспечения информационной безопасности, разработки интеллектуальных информационно-управляющих системы комплексной защитой инфокоммуникационного объекта (ИИУС КЗИО).

Существующие SCADA-системы, которые применяются на территории РФ с целью автоматизации процесса разработки программного обеспечения, используемые как в России, так и за рубежом, позволяют решать проблемы создания необходимого программного обеспечения для информационно-управляющих систем. В то же время, регламент функционирования этих систем не предполагает управление объектом, имеющим сложную структуру, отягощенную влиянием бихевиоральных факторов и плохо прогнозируемых угроз, носящих вероятностный характер, со стороны нарушителей разного типа [1].

Процесс интеллектуализации системы управления комплексной защитой инфокоммуникационных объектов позволит снизить уязвимость системы. Немаловажным является тот факт, ИИУС КЗОИ априори обладает свойством инвариантности по отношению к предметной области и обеспечивает повышение качества защиты объекта по критерию надежности. Множество задач, которые подразумевают комплексную защиту инфокоммуникационного объекта, не всегда позволяют использовать формализованные методы и модели оптимизации принимаемых решений, защиту технологических процессов обработки информации, событий и состояний. Это создает предпосылки для обострения информационного противоборства на качественно новом уровне. Возможность управления комплексной защитой объекта по критерию снижения риска/повышения надежности системы защиты в какой-то

степени носит противоречивый характер. С одной стороны, корректные в математическом отношении алгоритмы криптографической защиты, модели физической защиты объекта от внешних угроз и, с другой стороны, плохо формализуемые описания средств и методов управления персоналом, который принимает непосредственное или косвенное участие в процессе сбора, обработки, передачи и хранения конфиденциальной информации и/или имеет отношение к эксплуатации системы обеспечения информационной безопасности объекта. Именно наличие плохо формализуемых факторов затрудняет процесс моделирования алгоритмов оптимального управления системы обеспечения комплексной защиты объекта, и, как следствие, требует от разработчиков использования методологии искусственного интеллекта, как основы оптимального управления безопасностью объекта в режиме реального времени.

Требования, предъявляемые к ИИСУ КЗОИ. Классифицируя ИИУС КЗОИ, как стохастическую логико-динамическую систему определим требования, которым она должна удовлетворять:

1. Целевой характер системы, как наличие корректно сформулированной функции полезности системы защиты, формат отображения которой позволяет проводить сравнение и мониторинг полноты достижения цели.

2. Система должна быть способна и готова к развитию. Предполагается, что структура ИИСУ КЗОИ допускает расширение числа решаемых задач, позволяет изменять качественный уровень задач и степень их сложности и т.п.

3. Структурно-функциональное соответствие. Состав и структура ИИУС КЗОИ, построенные по иерархическому принципу должны определять регламент взаимодействия субъектов информационных отношений на защищаемом объекте, что обеспечит возможность ЛПР вносить корректировку в механизм управления и/или управляющее воздействие в зависимости от степени сложности и новизны проблемы, возникающей на объекте.

4. Оптимальное взаимодействие. Практика показывает, что самые лучшие решения, с точки зрения ожидаемого результата, могут не оправдать ожиданий при бездарном исполнении на уровне внедрения. ИИУС КЗОИ обеспечивает качественное исполнение принимаемых решений. Это достигается наличием в структуре системы управления механизма однозначного, не допускающего интерпретаций, толкования целей и задач, стоящих как перед отдельным исполнителем (элементом системы), так и перед коллективом исполнителей (структурным подразделением защищаемого объекта). Такое однозначное толкование является результатом внедрения в процесс постановки задачи и определения целей особых требований к персоналу: наличие единых целей, системное повышение квалификации и рост профессионализма, понимание значимости решаемых задачи и фиксированное определение ответственности за нарушения требований безопасности на объекте; самоопределение субъектов информационных отношений на защищаемом объекте; перевод участников процесса из разряда исполнителей рутинной работы в разряд творческих личностей.

Управление комплексной защитой объекта должно происходить в соответствии с принципами системного подхода, как правило, в несколько этапов, при этом на каждом этапе решаются задачи разной степени сложности:

1. Определение основных факторов, влияющих на качество защиты.
2. Выявление характера взаимосвязей между параметрами процесса защиты объекта и субъектов информационных отношений и степенью защищенности объекта
3. Определение качественных и количественных критериев оценки степени защищенности объекта информатизации
4. Определение механизма воздействия на основные компоненты системы защиты с целью повышения надежности и эффективности комплекса мероприятий по защите.
5. Мониторинг и анализ степени влияния внешних возмущающих воздействий на эффективность защиты.

Современная система комплексной защиты инфокоммуникационных объектов предъявляет высокие требования к используемым ресурсам: программно-аппаратным и техническим средствам защиты, уровню квалификации персонала, обеспечивающего разработку системы защиты и ее поддержку после внедрения. Инфокоммуникационные объекты, требующие комплексной защиты, как правило, обладают определенными особенностями, среди которых имеет смысл, в контексте данного исследования обозначить следующие:

– различная природа угроз информационной безопасности объекта;

– несовпадение форматов технологических режимов обеспечения информационной безопасности с точки зрения формирования стратегии управления инфокоммуникационным объектом;

– отсутствие общих критериев оценки эффективности используемых средств защиты.

Именно эти особенности, по мнению авторов, требуют введения интеллектуальной составляющей в процесс управления процессом комплексной защиты инфокоммуникационных объектов. В контексте проблем обеспечения информационной безопасности объекта предлагается под термином интеллектуальная информационно-управляющая система (ИИУС) понимать интегрированную систему, в структуру которой входят программно-аппаратные, технические и организационно-технические средства защиты информации, а перечень решаемых задач предполагает проведение анализа угроз и синтез управляющих воздействий без участия лица, принимающего решение (ЛПР). ИИУС КЗОИ реализована как сложная динамическая система, предназначенная для сбора, обработки, хранения и воспроизводства информации с целью оптимизации принимаемых решений. Основные структурные элементы системы агрегированы как функциональные и обеспечивающие подсистемы. В составе функциональных подсистем: управление персоналом; управление средствами физической, криптографической, аппаратной защиты; мониторинг угроз и других внешних возмущающих воздействий; подсистема аудита информационной безопасности объекта, подсистема планирования развития и оценки эффективности ИИУС КЗОИ. Обеспечивающие подсистемы имеют традиционную структуру и состав: информационное, техническое, математическое и программное, организационно-правовое обеспечение [2]. Каждая из подсистем оперирует тремя типами данных:

1. информация, запрашиваемая быза данных объекта;
2. подгружаемая информация;
3. информация, подлежащая преобразованию для вывода на экран.

Определен перечень сведений, которые необходимо разместить в базе данных с последующей обработкой: информация о структуре объекта защиты (перечень подразделений), структурных подразделениях: сведения о структуре подразделения и данные о его руководителе, персонале, статусе сотрудника; журнал посещений: информация о доступе к ресурсам, с указанием времени, цели и результатов доступа;информация о доступе к операционной системе, о попытках физического проникновения на объект, о внешних угрозах с указанием времени и результата,о методах и средствах защиты с указанием ответственных из числа персонала, об оценке степени защищенности объекта и моделях возможных нарушителей;информация о пользователях системы: логин пользователя, хэш пароля, по которому будет проходить идентификация и сравнение с посланными параметрами, статус пользователя, контактная информация.

Вся информация представлена в форматах, определенных используемым на объекте программным обеспечением. Предлагаемые алгоритмические схемы, структура и модели построения интеллектуальной информационно-управляющей системой управления комплексной защитой объекта позволяют создать эффективную модель управления событиями информационной безопасности. Значение данного исследования состоит в оригинальном подходе, интегрирующем методы формального и неформального моделирования для решения задач повышения эффективности управления комплексной защитой объекта информатизации.

Методология построения ИИУС КЗОИ обеспечивает синтез управляющих воздействий с учетом множества состояний инфокоммуникационного объекта, подвергающегося внешним и внутренним угрозам. Системное проведение таких этапов, как анализ предметной области, постановка задачи, формальное и неформальное моделирование предметной области, разработка алгоритма управления и синтез параметров управления, поиск решения задач управления, построение альтернативных архитектур, программная и аппаратная реализация управления ИИУС КЗОИ позволяют снижать риски уязвимости объекта.

Разработка системы, обладающей такой структурой обеспечения информационной безопасности объекта, потребовала провести сравнительный анализ различных методологических подходов к оценке эффективности защиты, который позволил создать алгоритм управления качеством защиты, обеспечивающий, по мнению авторов, повышение надежности системы обеспечения информационной безопасности объекта:

– определение эталонного уровня защиты для конкретного объекта в соответствии с требованиями ФСТЭК, стандартами;
– формирование системы критериев оценивания качества защиты;
– расчет интегрального показателя защищенности инфокоммуникационного объекта;
– сравнение расчетного показателя с эталонным;
– определение стратегии формирования управляющих воздействий.

Наиболее уязвимым звеном в данном алгоритме с точки зрения возможности его автоматизации и интеллектуализации представляется процесс формирования системы критериев оценивания качества защиты инфокоммуникационного объекта.

Механизм формирования системы критериев - задача, которая в процессе исследования решалась методом экспертных оценок в формате «мозговой эстафеты» [3]. Группе экспертов ставится задача сформулировать критерии оценивания степени защищенности объекта. После этапа индивидуальной работы каждый эксперт зачитывает «свои» критерии, остальные делают численную оценку критерия (ранг) по пятибалльной системе; после обработки полученных данных формируется набор критериев, из которого для дальнейшей работы выбрано 9 критериев с оценкой выше трех баллов (таблица 1).

В процессе создания ИИУС КЗОИ был разработан программный модуль «мозговой эстафеты», который выполнен в сетевой версии. После запуска программы участники процедуры обсуждения получают возможность войти в клиентскую часть программы, которая открывает окно обсуждения. Эксперты, принимающие участие в процедуре вводят свои предложения по решению обсуждаемой проблемы, в данном случае те критерии, которыми, по их мнению необходимо руководствоваться в процессе оценки степени защищенности объекта. На сервере появляется перечень рабочих станций, от которых пришел текст и /или формулировка ответа на поставленный вопрос и проставленная экспертом оценка. Сервер выполняет рассылку полученных текстов без выставленных оценок, что бы не оказывать давления на эксперта, тем самым обеспечивается анонимность оценок, что повышает объективность результата оценивания.

Таблица 1 – Критерии оценивания степени защищенности объекта

Критерий	Ранг
Соответствие формальным требованиям (стандарты, законодательство)	4,62
Защита от несанкционированного доступа	4,81
Безопасность приложений	3,12
Физическая безопасность объекта	3,0
Определение ответственности персонала за нарушение требований безопасности	3,65
Антивирусная защита	3,81
Мониторинг, контроль и управление удаленным доступом	3,43

Контроль доступа в операционную систему	4,1
Управление сетями	3,27

После того, как все эксперты выполнят оценку всех поступивших предложений, формируется итоговая таблица, проводится расчет средней оценки каждого предложения, заполняется итоговая форма. Программный модуль «мозговая эстафета» - это отдельная часть ИИУС, которая позволяет оперативно вырабатывать управляющие воздействия, обеспечивающие в реальном масштабе времени снижение уязвимости объекта.

После формирования системы критериев осуществляется переход к следующему этапу: построение математической модели оценки степени защищенности объекта информатизации. Очевидно, что для решения задач данного класса существуют различные подходы к построению математической модели. В процессе исследования рассматривались такие альтернативы: оценка степени защищенности объекта на основе одно- или многокритериальной задачи. Тот факт, что надежность защиты находится в прямой зависимости от состава и структуры средств защиты объекта позволяет утверждать, что для решения поставленной задачи целесообразно применить методы теории игр и методику формирования элитных групп.

Комплексная защита объекта, как многокритериальная задача (МКЗ). Для получения интегрального показателя качества всей системы обеспечения информационной безопасности объекта формируется пространство критериев оценки средств обеспечения безопасности (технических, программно-аппаратных, организационных, правовых). Для решения МКЗ методом экспертных оценок создается матрица размерностью m×n где m-строки матрицы – средства защиты P_i; столбцы n– это критерии оценки K_j выбранных средств. Численные значения критериев определим, используя выше описанный программный модуль. Так как каждый из критериев может иметь различное значение (в зависимости от мнения экспертов) вычисляем коэффициент согласия S, алгоритм расчета которого известен и неоднократно описан [4]. Таким образом, метод мозговой эстафеты в ручном или машинном варианте позволяет решить многокритериальную задачу определения оптимальной стратегии комплексной защиты инфокоммуникационного объекта. Для ЛПР есть две возможные стратегии, каждая из которых обладает как достоинствами, так и недостатками.

Вариант первый: система критериев жестко определена. При использовании детерминированного формата идентификации системы показателей полноты достижения цели нередки случаи появления несравнимых альтернатив. При решении задачи оценки качества защиты как задачи выбора наиболее предпочтительной альтернативы в условиях неопределенности при отсутствии полных данных о надежности каждой группы средств защиты необходимо применять интегральную оценку, в основе расчета которой лежит аддитивная функции полезности. Справедливость требует отметить, что использование аддитивной функции полезности для решения реальных многокритериальных задач имеет определенные ограничения, одно из которых сложность поиска решения при большом (более четырех) количестве критериев. Этот факт снижает привлекательность метода.

Вариант второй. Задается система критериев, по которым есть полный набор данных и их (критерии) можно представить в относительных единицах. При таком подходе на этапе постановки задачи нужно определиться с числом критериев. Наиболее целесообразно множество критериев формировать по принципу полноты данных: вводить те критерии, по которым данные определены. Матрица исходных данных формируется как агрегат обозначенных критериев, а оценивание альтернатив проводится по принципу максиминного выбора, который отражает осторожный (без риска) подход к решению задачи. В случае, если число критериев недостаточно необходимо менять механизм поиска оптимального решения и использовать другие методики, например, принятие решений в условиях неопределенности. Методологический подход, основанный на принципах выбора в условиях неопределенности, позволяет получать адекватное решение, при этом вычислительная часть не представляет особой сложности даже при достаточно большой размерности МКЗ.

Использование данной методологии в процессе разработки ИИУС КЗОИ имеет определенные ограничения:

– невозможность корректной постановки задачи из-за большого количества слабо формализуемых факторов и применения оценок на уровне описания свойств и характеристик;

– неумение ЛПР применять существующие разработки в практике обоснования принимаемых решений и т.п.

Наиболее реальным, по мнению авторов, можно считать подход, который для решения многокритериальной задачи в условиях неопределенности позволяет выполнить переход к однокритериальной задаче путем введения нового критерия, тем или иным образом включающего в себя исходные показатели функционирования системы.

Такой подход представляет интерес при использовании критериальных оценок для решения практических задач управления сложными системами, какой является комплексная защита инфокоммуникационного объекта.

Комплексная защита объекта, как однокритериальная задача. Для перехода к однокритериальной задаче необходимо, используя метод экспертных оценок, вводить систему весовых коэффициентов или определения суперкритерия. Для определения весовых коэффициентов или выбора суперкритерия необходимы механизмы, которые защищают процедуру выбора от влияния субъективных точек зрения экспертов. В настоящее время достаточно широко распространены механизмы аддитивной и мультипликативной свертки и описанный выше механизм мозговой эстафеты в машинном варианте.

Вывод.

Таким образом, рассматривая задачу управления качеством защиты инфокоммуникационного объекта с позиций определения функции полезности, следует сделать вывод, что подобная практика целесообразна лишь в том случае, если имеются полные данные об эффективности каждой группы средств обеспечения информационной безопасности, необходимые и достаточные для решения задач подобного класса данные о параметрах. Отдельным сдерживающим фактором являются те жесткие требования, которые предъявляются к уровню математической подготовки ЛПР.

Так как реальная практика управления показывает, что выявление проблем и выработку управляющих воздействий приходится выполнять оперативно в условиях неопределенности, считаем целесообразным рекомендовать для практического использования инновационные методы управления качеством защиты объекта. Так, формирование плана комплексной защиты объекта информатизации целесообразно проводить в форме организационно-деятельностной игры [5], в которой имеется четкое разграничение этапов разработки проекта:

1. определение целей и задач предполагаемой системы защиты;
2. формирование структуры ИИУС КЗОИ;
3. выявление основных проблем и «слабых мест» в существующей системе защиты;
4. формирование системы критериев оценки степени защищенности объекта
5. идентификация задачи, построение математической модели и подбор инструментальных средств/алгоритма решения.

Комплексное использование методов формального и неформального моделирования при проведении аудита информационной безопасности на объекте и формировании плана защиты объекта информатизации позволит получить объективные оценки фактического состояния уязвимости системы, сделать прогноз рисков и своевременно принять меры по повышению надежности используемых средств защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://en-res.ru/stati/scada.html
2. Буреш, О.В. Интеллектуальные информационные системы управления социально-экономическими объектами / О.В. Буреш, М.А. Жук. - М.: Красанд, 2012. - 192 с.

3. Клименко И.С. Агрегатный подход к решению многокритериальной задачи выбора// Вестник КСТУ.- Костанай, 2012-№1.- С.61-67.

4. Клименко И.С. Модели и методы управления. Экономическая кибернетика: экономико-математическое моделирование. Курс лекций: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения / И.С. Клименко. – 3-е издание. − М.: «КДУ», «Добросвет», 2019. – 186 с. – doi: 10.31453/kdu.ru.91304.0023.

Клименко И.С. От технологии 2С к технологии 2Д/ Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. – 284 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-315-322

Гребенников Александр Сергеевич, Гребенников Сергей Александрович,
Кедрова Елена Николаевна

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИИ КУЗОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМОБИЛЕЙ

Аннотация. *Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований развития коррозионных разрушений кузовных элементов пассажирских автотранспортных средств в процессе эксплуатации, которые необходимо учитывать при прогнозировании текущих годовых расходов на поддержание их работоспособности. Отражены взаимосвязь интенсивности развития общей коррозии с усталостными разрушениями элементов конструкций кузовов и неравномерность изменения технического состояния по одноименным облицовочным и несущим деталям и сборочным единицам кузовов.*

Ключевые слова: *автомобиль, кузов, коррозионно-усталостные разрушения, неравномерность, ремонт.*

Annotation. *The results of experimental and theoretical studies of the development of corrosion damage of body elements of passenger vehicles during operation, which must be taken into account when predicting the current annual cost of maintaining their performance. It is reflecting the relationship of the development intensity of the total corrosion fatigue damage of structural elements of the body and the unevenness of changes of the technical state of the same name facing the supporting parts and Assembly units of the body.*

Keywords: *car, body, corrosion-fatigue failure, unevenness, repair.*

Введение.

Необходимость прогнозирования технического состояния автотранспортного средства (АТС) коренится в объективных тенденциях ухудшения первоначальных качественных свойств его полезности, представляемых в виде графического отображения динамики их изменения во времени T (годы) или относительно пробега l (тыс. км).

По известным динамикам обосновываются нормативы технических воздействий для выполнения регламентных профилактических работ, планируются текущие расходы на запасные части и эксплуатационные материалы и определяется целесообразность использования АТС на предстоящем этапе жизненного цикла.

При этом к закономерным (постепенным) отказам элементов автомобиля в процессе эксплуатации преимущественно относят отказы, вызванные изнашиванием и усталостными разрушениями деталей, доля которых превышает 70% всех отказов автомобиля. Остальные отказы принято считать случайными, в том числе, по причинам коррозии и усталостных деформаций (нарушенной пространственной ориентации) кузовных элементов, которые обычно рассматриваются с позиций прогнозных функций их долговечности, поскольку кузов является остовом пассажирских АТС (ПАТС) — легковых, грузопассажирских и автобусов, — определяющим срок его службы. Только в отдельных работах [1, 2, 6, 8] приводятся результаты, характеризующие коррозионную и коррозионно-усталостную стойкость кузовных элементов ПАТС как функцию пробега или срока эксплуатации.

Коррозия металла, возникающая на поверхности кузовных элементов ПАТС под действием химических или электромеханических воздействий, приводит к нарушению

плотности заклепочных и сварных соединений, возникновению трещин и деформаций в деталях ферм и нижней части (пола) кузова, и, наконец, эстетического вида. При этом восстановительные кузовные работы ПАТС считаются наиболее затратными в сфере технической эксплуатации, а их планирование в большинстве автотранспортных предприятий (АТП) происходит спонтанно. Расходы на них составляют от 1/3 до 1/2 стоимости новых автобусов, а потребление металла при восстановлении пораженных коррозией элементов кузовов за амортизационный срок достигают 40% от их массы, а в ряде случаев — 60% поверхности кузовных деталей [1, 2, 8, 9].

Сказанное определяет теоретическую и практическую важность обоснования нормативных требований по восстановительным кузовным работам на основе исследований динамики коррозионных разрушений кузовных деталей в процессе эксплуатации ПАТС, что позволит решить проблемную задачу по снижению эксплуатационных затрат и экономии материальных ресурсов на обеспечение работоспособности ПАТС коммерческого использования.

Цель данной работы — экспериментальное обоснование экспоненциальной зависимости развития коррозионных и коррозионно-усталостных разрушений кузовных элементов ПАТС в процессе эксплуатации.

Основные теоретические положения

В работе [4] обоснована зависимость общей коррозии как площади FK(T) коррозионного поражения кузовных элементов от срока эксплуатации T:

$$F_{K(T)} = F_{к0}(e^{b_к T} - 1), \quad (1)$$

где $b_K = \frac{V_K}{F_K}$ — параметр, характеризующий изменение скорости коррозии V_K на единицу площади F_K коррозионного поражения; $F_{K0} = \frac{V_{K0}}{b_K}$ — условная начальная площадь видимых нарушений сплошности лакокрасочного покрытия и коррозионного разрушения после инкубационного периода эксплуатации, который для большинства современных ПАТС составляет 5 лет.

Приведенные теоретические доводы справедливы и для локальной коррозии, которой подвержены, как правило, несущие элементы каркаса кузова. Отличительной особенностью такой коррозии является ее более высокая скорость, которая и оценивается несколько иначе — по глубине коррозионного поражения. Поэтому кинетика развития по зависимости (1) справедлива и для толщины h пленки окисла коррозионного поражения:

$$h = h_0(e^{b_K T} - 1) \quad (2)$$

где h_0 — условная начальная толщины пленки окисла коррозионного поражения.

С учетом (2) значение прогнозируемой толщины не пораженного коррозией слоя металла (остаточной глубины $h_{ост}$) составит:

$$h_{ост} = h_н - h_0(e^{b_K T} - 1), \quad (3)$$

где h_H — номинальная толщина металла облицовочных панелей и деталей каркаса кузова.

Динамики коррозионных разрушений элементов кузова ПАТС от срока эксплуатации и пробега имеют единый физический смысл, однако отметим, что если среднегодовые пробеги ПАТС не значительны (до 50 тыс. км [2, 5]), то коррозионные разрушения в основном определяются длительностью эксплуатации.

Протекая одновременно, коррозионные и усталостные разрушения являются взаимно усиливающими процессами интенсивности изнашивания элементов кузова ПАТС, так как

распространению усталостных трещин внутрь металла способствует коррозия поверхности трещин.

Интенсивность усталостных разрушений в процессе эксплуатации также увеличивается по причине расклинивающего действия продуктов коррозии, имеющих больший объем, чем объем металла (критерий Пиллинга-Бедворда), из которого они образовались.

Поскольку число N циклических нагружений на элементы кузова в конкретных условиях эксплуатации ПАТС пропорционально пробегу l, то изменение, другими словами, накопление усталостных разрушений в несущих элементах кузовов также подчиняется экспоненциальной зависимости вида (2):

$$h_y = h_{0y}(e^{b_y l} - 1) \qquad (4)$$

где h_y — геометрический параметр, характеризующий усталостное разрушение по длине, ширине или глубине трещины, мкм; h_{0y} — начальный геометрический параметр усталостного разрушения, мкм; b_y — параметр, характеризующий сопротивляемость усталостным разрушениям (интенсивность их развития по пробегу или временному интервалу).

Таким образом, кинетика коррозионной усталости подчиняется таким же закономерностям, как и усталость в отсутствии активной коррозионной среды, но имеющим другие параметры, обусловливающие более интенсивное развитие усталостных разрушений.

Результаты экспериментального исследования

Основными объектами экспериментального исследования коррозионных разрушений были кузова автобусов большой и особо большой вместимости (ЛАЗ-697М, Икарус-280 и ЛиАЗ-677), среднего класса (ПАЗ-672), микроавтобусы РАФ и легковые автомобили ВАЗ, Daewoo Lanos. В работе использованы собственные экспериментальные данные нескольких лет наблюдений за интенсивностью распространения общей, локальной коррозии и усталостно-коррозионных разрушений [4, 5], а также результаты, приведенные в работах [1, 2, 6, 8, 9] Показатели (площади, глубина проникновения) изменения общей коррозии регистрировались на примерах облицовочных элементов кузова АТС, локальной коррозии — несущих элементов.

На первом этапе экспериментального исследования оценивалась справедливость зависимости (1). Как следует из показателей достоверности R2>0,9 накопленного статистического материала изменения показателя площади коррозионного поражения облицовочных деталей, дверей, панелей багажного и аккумуляторного отсеков кузовов автобусов большого и особо большого класса от срока эксплуатации (рис. 1 и 2) по теоретически обоснованной зависимости (1), степень ее соответствия опытным данным высокая и значимая.

Сравнивая показатели общей коррозионной устойчивости облицовочных элементов кузовов по автобусам типов «Икарус-280» (рис. 1, а) и «ЛиАЗ-677» (рис. 2, а), отметим, что коррозионные разрушения кузовов «ЛиАЗ-677» в 1,15 раза выше.

Дифференцированная оценка всей совокупности значений зон поражений коррозией металлических корпусных элементов автобусов большого класса была проведена по условно выделенным двум группам. Первую группу составили ресурс определяющие, критичные по надёжности (двери, панели багажного и аккумуляторного отсеков), вторую — более долговечные (боковые облицовочные панели).

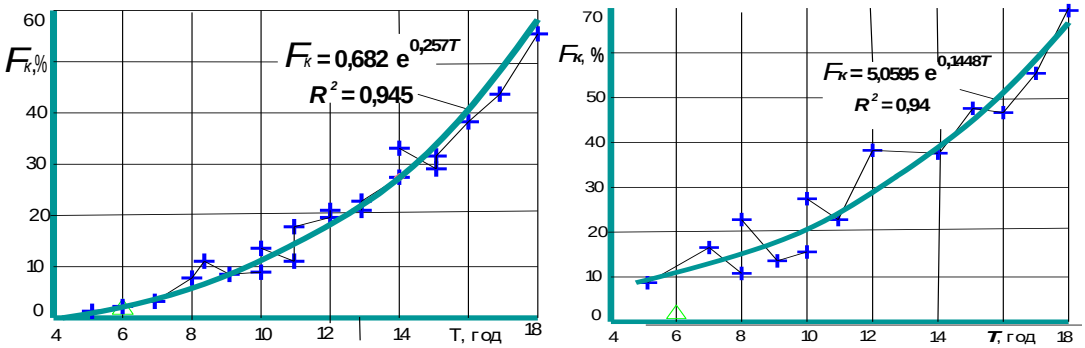


Рис. 1. Изменения площади FK коррозии боковых облицовочных панелей (а), дверей и багажного отсека (б) «Икарус-280» от срока Т эксплуатации

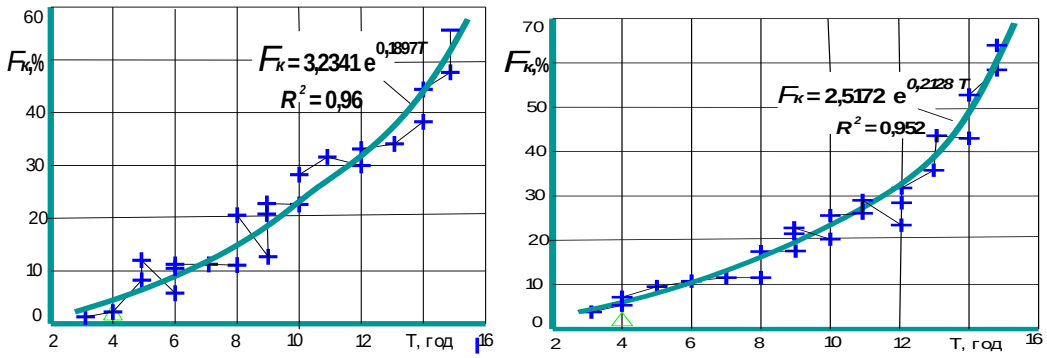


Рис. 2. Изменения площади FK коррозии облицовочных панелей (а), дверей и панелей аккумуляторного отсека (б) «ЛиАЗ-677» от срока Т эксплуатации

Большая скорость коррозии элементов первой группы обусловлена конструктивным их назначением и ухудшенными условиями эксплуатации. Они имеют повышенные показатели: уровня динамических нагрузок, особенно, двери, открывание-закрывание которых часто затруднено в часы «пик»; влажности и концентрации паров серной кислоты панелей аккумуляторного и багажного отсеков, усугубляемых значительными перепадами температуры окружающей среды и недостаточной их вентиляции.

Результаты экспериментальных данных свидетельствуют: детали первой группы коррозируют в 1,2…1,6 раза интенсивнее, чем второй. Среди одноименных деталей кузовов отмечена разность воздействия коррозии по сторонам облицовочных панелей: левая сторона ПАТС имеет на 5…10% меньшую интенсивность, чем правая. Подобная неравномерность показателя долговечности отдельных одноименных кузовных элементов характерна и для легковых автомобилей (табл. 1 [3]).

Таблица 1.

Элемент кузова	Доля деталей по сторонам автомобиля, число / %	
	С левой стороны	С правой стороны
Лонжерон с брызговиком	229 / 24,8	232 / 25,2
Крыло переднее	270/29,3	273 / 29,6
Крыло заднее	258 / 28,0	263 / 28,5
Арка наружная	101 / 10,9	114 / 12,4
Арка внутренняя	52 / 5,6	53 / 5,7
Дверь передняя	250 / 27,1	253 / 27,4
Дверь задняя	238 /25,8	244/ 26,4
Боковина кузова	201 /21,8	205 / 22,2
Лонжерон задний	29 / 3,1	30 / 3,2

Приведенные выводы экспериментальных исследований общей коррозии кузовных элементов, подтверждающих аналитические предпосылки (1) справедливы и для локальной коррозии, которой в основном подвержены несущие элементы каркаса кузова.

Локальная коррозия несущих элементов кузовов ПАТС наблюдается в двух видах: по степени (площади) сквозного поражения и по глубине проникновения слоя ржавчины. В качестве наиболее типичного примера для анализа экспериментальных результатов выбран продольный брус надколесной ниши кузова автобуса «Икарус-280», отображенный на рис. 3.

Рис. 3. Коррозионно-усталостные разрушения продольного бруса надколесной ниши автобуса «Икарус-280»

Проведенная обработка фотографий и микрошлифов продольного бруса ниши, полученных при ремонте кузовов автобусов с различными сроками эксплуатации, позволила определить достоверность кинетики развития локального коррозионного сквозного поражения по зависимости (2). Ее оценка осуществляется по глубине h коррозионного поражения продольного бруса в средней части ниши, расположенной над осью ведущего моста автобуса, где наиболее активно развивается коррозия.

На рис. 4 представлены экспоненциальные зависимости по глубине коррозионного поражения внутренней $h_{вн}$ и наружной (внешней) $h_{внеш}$ сторон профиля продольного бруса крепления колесной ниши автобуса «Икарус-280» от срока эксплуатации, подтверждающие теоретические выводы (2): $h_{вн} = 0,068(e^{0,130T} - 1)$, R^2=0,91; $h_{внеш} = 0,047(e^{0,135T} - 1)$, R^2=0,96.

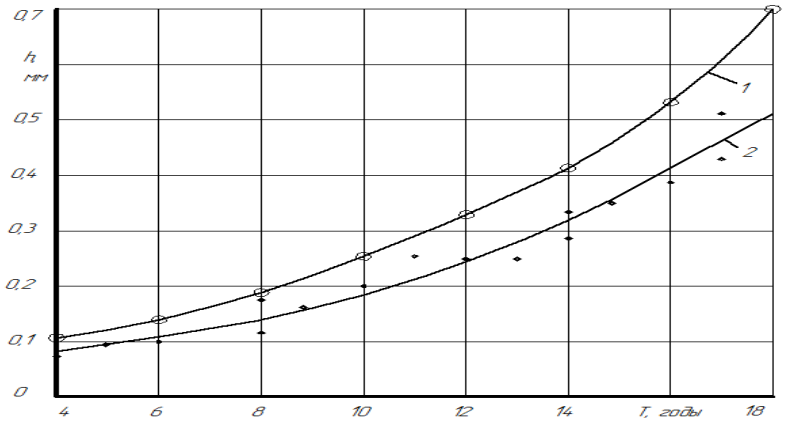


Рис. 4. Изменение глубины коррозии внутренней (1) и внешней (2) сторон продольного бруса колесной ниши «Икарус-280» от срока *T* эксплуатации

Сравнение показателей изменения глубины поражения в зонах продольного бруса колесной ниши показывает, что интенсивность коррозии с внутренней стороны его профиля в

1,3 раза выше, чем наружной, что объясняется повышенной ее влажностью по причине недостаточной вентиляции.

Результаты анализа статистических данных [1] исследования долговечности элементов кузовов легковых автомобилей ВАЗ показали, что, помимо неравномерности показателей общей и локальной сопротивляемости коррозии одноименных элементов относительно расположения левой и правой сторон (табл. 1), им характерна существенная разность ресурсов среди всей совокупности деталей. К числу элементов с наименьшим запасом работоспособности относятся передние и задние крылья, нижние части арок задних колес, боковин кузова и дверей, крайние области щитка передка. При среднегодовом пробеге автомобиля 10–15 тыс. км продолжительность работы перечисленных деталей составляет примерно 5,5–6,5 лет. Несколько большим ресурсом обладают остальные элементы кузова. При том же среднегодовом пробеге продолжительность их работы достигает 8–9 лет.

Неравномерность развития общей и локальной коррозии элементов кузова легковых автомобилей также подчиняются экспоненциальной зависимости. Например, для переднего крыла кузова ВАЗ-2106 зависимость степени соотношения $K_{Fк}$ площади поражения коррозией переднего крыла к общей его площади, выраженной в %, имеет следующий вид:

$$K_{Fк} = 0{,}0087\, e^{(4{,}1147T + 0.00606l)},$$

где T — продолжительность эксплуатации, годы; l — пробег автомобиля за период T, тыс. км.

Экспоненциальные зависимости общей и локальной коррозии от срока эксплуатации ПАТС подтверждаются экспериментальными данными и по другим элементам несущих профилей кузова с высокой теснотой связи и значимостью.

Кинетику степени коррозионной усталости несущих элементов кузова оценивали по значениям суммарных длин трещин в сварных соединениях продольного бруса с другими деталями (их 6) крепления надколесной ниши кузова (см. рис. 3) по мере эксплуатации. Длину трещин измеряли курвиметром с точностью 1 мм. Результаты обработки экспериментальных данных роста трещины в сварных соединениях продольного бруса наиболее подверженной коррозионной усталости правой надколесной ниши кузова автобусов «Икарус-280» от срока эксплуатации по экспоненциальной зависимости (4) и ее параметры приведены на рис. 5.

Выполненные исследования по усталостно-коррозионной стойкости несущих элементов в области колесных ниш, дверных проемов, аккумуляторных и багажных отсеков автобусов, а также кузовных элементов легковых автомобилей-такси показали высокую степень соответствия опытных данных теоретически обоснованной экспоненциальной зависимости (4) с возрастающей интенсивностью поражения несущих элементов ПАТС в процессе эксплуатации.

Косвенно подтверждающие данный вывод результаты изложены в монографиях [1, 2], которые отражают исследования общей долговечности кузовных элементов легковых автомобилей. Например, рис. 6 по статистическим данным [2] представлена графическая интерпретация экспоненциальной зависимости усталостно-деформационных отклонений местоположений контрольных точек кузова автомобиля марки «*Daewoo Lanos*» от срока его эксплуатации с высоким коэффициентом достоверности ($R^2 > 0{,}9$).

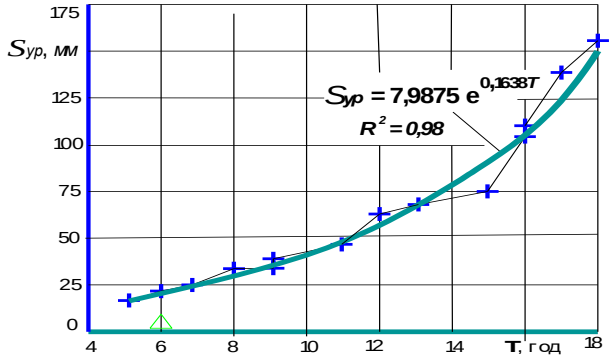


Рис. 5. Изменение суммарной длины $S_{УР}$ коррозионно-усталостных трещин сварных соединений продольного бруса с элементами крепления ниши над ведущими колесами «Икарус-280» от срока T эксплуатации

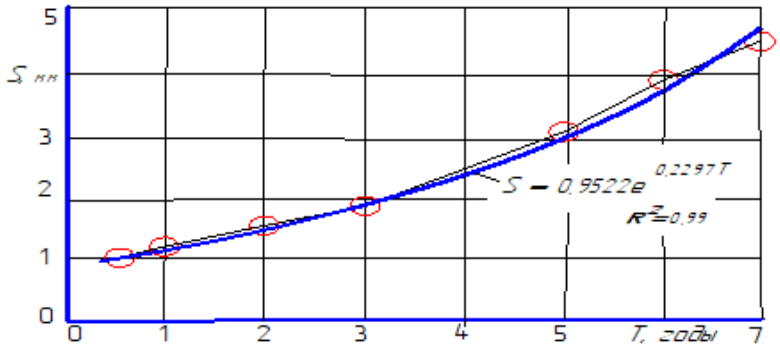


Рис. 6. Зависимость деформационных отклонений S контрольных точек кузова автомобиля «*Daewoo Lanos*» от срока T эксплуатации

Для автомобилей ВАЗ классической компоновки зависимости показателей коррозионно-усталостных поражений, приводящих к недопустимой деформации основания и стоек боковин кузова в процессе эксплуатации, приведены в [1]. Из условия, что предельные отклонения контрольных точек кузова находятся в интервале 6–8 мм, продолжительность эксплуатации T (годы) и пробег l (тыс. км) автомобиля (кузова) до достижения предельных значений смещения $S_{п.к.т}$ контрольных точек определяются из уравнения неравенства экспоненциального вида

$$6 \le [S_{п.к.т} = 1{,}8496\, e^{(0{,}0806T + 0.0038l)}] \le 8,$$

откуда можно получить:

$$0{,}0806T + 0.0038l) < \ln(8/1{,}8496) \rightarrow T < 18{,}17 - 0{,}047l; \quad (5)$$

$$(0{,}0806T + 0.0038l) > \ln(6/1{,}8496), \rightarrow T < 14{,}0 - 0{,}047l \quad (6)$$

Зависимости (5) и (6) показывают прогнозируемые границы эксплуатации кузова, на которых происходят недопустимые (предельные) коррозионно-усталостные разрушения кузова.

Таким образом, кинетика коррозионной усталости в процессе эксплуатации ПАТС подчиняется таким же экспоненциальным зависимостям, как и усталость в отсутствии активной коррозионной среды, но имеющим другие, худшие параметры, обусловливающие более интенсивное ее развитие.

Рассмотренные примеры подтверждают правомерность представления и динамики эксплуатационных затрат по зависимости (1), то есть закономерное изменение технического состояния кузова в процессе эксплуатации обусловливает соответствующее экспоненциальное увеличение расхода металла на компенсацию коррозионных и коррозионно-усталостных разрушений, а также соответствующих затрат на ремонт.

Зависимость (1) и рекомендации ее использования характерны для большинства регионов России. В зонах с экстремальными условиями эксплуатации ПАТС, к которым относятся районы [9] очень жаркого сухого климата с высокой агрессивностью окружающей среды, а также холодного и очень холодного климата (Крайний Север) [7], при планировании квартальных и полугодовых затрат на кузовные работы дополнительно необходимо учитывать и сезонность предстоящих транспортных работ. В этих районах, помимо отмеченной неравномерности изменения затрат по годам эксплуатации, существуют значительные периодические всплески потока отказов элементов АТС по временам года. Они вызваны природно-климатическими воздействиями окружающей среды на тепловой и нагрузочный режимы работы сопряжений агрегатов АТС, а также связаны с высокими перепадами температуры воздуха, солнечной инсоляции, коррозионной агрессивности и изменением дорожных условий в зависимости от сезона эксплуатации [7, 9].

Сезонная нестабильность поступления ПАТС на ТР имеет место и в прилегающих к центральной зоне областях, но менее выражена. В частности, обобщающие данные [9] свидетельствуют, что если показатели надежности городских автобусов большого класса в умеренной климатической зоне в летний период принять за 100 %, то в осенние и весенние месяцы эксплуатации показатели надежности снижаются на 3 ÷ 5 %, а в зимние — на 20 %.

Заключение

Экспериментально подтверждены экспоненциальные зависимости неравномерности изменения показателей площадей общей, локальной коррозии облицовочных и несущих элементов кузова, коррозионно-усталостных их разрушений (1), (2). Поэтому годовые планируемые эксплуатационные затраты на обеспечение работоспособности кузовов необходимо корректировать применительно к конкретному периоду эксплуатации АТС, а для регионов с экстремальными условиями следует учитывать периодическую составляющую дополнительных эксплуатационных затрат, зависящую от сезона года. Подобные коррективы существующих нормативных требований по технической эксплуатации ПАТС [6], учитывающие (1), (2), (3), (4), необходимы для более объективного планирования годовых эксплуатационных затрат на текущие, средние и капитальные ремонты по кузовным работам в АТП в различные периоды, вплоть до утилизации (списания); для прогнозирования остаточного ресурса кузовов ПАТС при известных предельных значениях коррозионного их износа и сроков проведения очередных капитальных ремонтов кузова; для определения номенклатуры и объема выпуска запасных частей фирмам и заводам-изготовителям ПАТС, особенно по легковым автомобилям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобили ВАЗ: Изнашивание и ремонт / А. А. Звягин, М. А. Масин, А. М. Мотин, Б. В. Прохоров; Под ред. А.А. Звягина. - Л.: Политехника, 1991. – 255 с.

2. Бажинов, А.В. Долговечность легкового автомобиля / А.В. Бажинов, Е.А. Серикова, А.М. Быков.- Харьков: Мачулин, 2012. -178 с.

3. Гребенников, А.С. Зависимость ресурса агрегата автомобиля от неравномерности исходных зазоров в одноименных сопряжениях / А.С. Гребенников, С.А. Гребенников, А.В. Коновалов // Вестник машиностроения. 2007, № 6. - С. 34-39.

4. Денисов, А.С. Неравномерность коррозионных разрушений элементов автомобиля в процессе эксплуатации / А.С.Денисов, С. А. Гребенников, А.С. Гребенников, А.С. Обельцев // Автотранспортное предприятие, 2014, №10. – С. 43-45.

5. Денисов, А.С. Цикличность изменения затрат на устранение коррозионных разрушений автомобиля / А.С.Денисов, С. А. Гребенников, А.С. Гребенников, А.С. Обельцев // Автотранспортное предприятие, 2015, №5. – С. 49-52.

6. Егоров, В.А. Прогнозирование затрат на кузовные работы / В.А.Егоров, А.А. Абакаров, С.В. Жанказиев //Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2005, №5. – С.79-84.

7. Ишков, А. М. Математическая ритмология в работоспособности техники на Севере./ Якутск: Изд-во Якутский научный центр СО РАН ГУП «Полиграфист». 2000. 320 с.Порватов, И.Н. Исследование интенсивности коррозии кузовов автобусов: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МАДИ. 1979. – 17 с.

8. Техническая эксплуатация автомобилей /Под ред. Е.С. Кузнецова.- М.: Наука, 2001.- 535 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-323-329

Елькин Дмитрий Максимович, Вяткин Валерий Владимирович

Южный федеральный университет

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ: МНОГОАГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ В КОНЦЕПЦИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Аннотация. *Интернет вещей (IoT) — это важная технология будущего, которая позволит сделать инфраструктуру нашего общества разумной и адаптируемой к потребностям пользователей. Одной из таких инфраструктур является транспорт. В этой статье рассматриваются существующие методы и алгоритмы для автоматического управления дорожным движением с целью определения точек и методов для применения IoT в этом секторе. Обсуждаются преимущества и недостатки существующих методов, в том числе оценка их эффективности.*

Ключевые слова: *распределенные системы, управление трафиком, дорожное движение, заторы, интернет вещей.*

Abstract. *Internet of Things (IoT) is an important upcoming technology for making infrastructures of our society smart and adaptable to the users' needs. One such infrastructure is transportation. This article discusses existing methods and algorithms for automated management of traffic flows with a purpose of identifying hot spots and methods for applying IoT in this sector. Advantages and disadvantages of the existing methods are discussed, including evaluation of their effectiveness.*

Введение

Связь между дорогами и городами очевидна. Основными особенностями дорожной инфраструктуры являются длительный срок службы и высокая стоимость, а это значит, что эту проблему можно решить в настоящий момент, сохранив эти объекты в их первоначальном состоянии. Экономические расчеты [13] показывают, что эффективно управлять движением на существующих дорогах выгоднее, чем строить новые, хотя это и не очень дешево с экономической точки зрения. Опыт многих крупных мегаполисов мира [14] показывает, что строительство новых и реконструкция существующих автомобильных дорог и дорог с постоянным увеличением количества транспортных средств не позволяет полностью уменьшить разницу между пропускной способностью дорог и уровень спроса на автомобильный транспорт.

Высокие затраты на строительство новой дорожной инфраструктуры, пробки и экологические факторы подталкивают компании и правительство к поиску решений для более эффективного управления транспортными потоками. Сейчас активно принимаются меры для смягчения негативных последствий заторов и оптимизации использования ограниченных государственных средств.

В европейских странах, таких как Дания, Великобритания, Германия и Нидерланды, использование передовых подходов к динамическому перераспределению потоков с использованием автоматизированных систем дало следующие результаты [1]:

- увеличение средней пропускной способности дорожной сети в период перегрузки (в часы пик) на 3–7 процентов;
- увеличение общей пропускной способности транспортной сети на 3–22 процента;
- снижение первичных аварий на 3–30 процентов;
- снижение вторичных аварий на 40-50 процентов;
- выравнивание скорости транспортного потока в период перегрузки дорожной сети;
- более предсказуемое поведение участников дорожного движения;

– повышение безопасности на дороге;
– сокращение пробок на автомобильных дорогах.

Таким образом, при использовании новейших средств и разработок в области управления дорожным движением можно не только избавить дорожную сеть от систематически возникающих пробок, но и значительно сократить государственные расходы на организацию дорожного движения в целом.

Интернет вещей (IoT) — это текущий мегатренд в развитии информационных и управляющих технологий. Целью данной работы является изучение возможности применения технологии Интернета вещей для организации дорожной инфраструктуры и поиска новых способов динамического управления транспортными потоками.

Исследование типовых подходов к управлению дорожным движением

Светофор является основным средством управления транспортными потоками, а компьютерные контроллеры обычно используются для переключения сигналов светофора, чтобы справиться с постоянно меняющейся интенсивностью движения, для оптимизации процесса управления, используются контроллеры с несколькими программами (часы пик, дневное и ночное время).

Многопрограммное жестко заданное регулирование помогает уменьшить задержку, но не является оптимальным. Оно не может учесть случайное прибытие транспортных средств на перекресток. Решением этой проблемы является адаптивное управление с обратной связью с транспортным потоком. Для этого контроллеры получают непрерывную информацию о состоянии транспортного потока от транспортных детекторов, расположенных в зонах пересечения. Транспортные детекторы предназначены для регистрации проезжающих транспортных средств и определения параметров транспортного потока [21].

Дальнейшим развитием идеи координации работы отдельных светофоров стало создание автоматизированных систем управления дорожным движением, способных контролировать дорожную сигнализацию по всему городу, объединяя управляемые светофоры с единым центром управления и синхронизируя их работу.

Для описания организации управления трафиком полезна многоуровневая архитектура, состоящая из 5 уровней, описанная следующим образом [21]:

Низший уровень системы автоматического управления отвечает за такие функции как стабилизация, или программные изменения параметров объекта в соответствии с настройками, заданными верхним уровнем системы автоматического управления. На уровне системы автоматического управления используются технические средства, такие как цифровые контроллеры и традиционные контроллеры непрерывного действия.

Уровень автоматизированных систем управления оптимизирует управление ограниченным набором объектов, которые подчиняются соответствующим оптимизаторам. Задачи управления трафиком на этом уровне системы могут отличаться от общих задач функционирования всей системы. По крайней мере, необходимо учитывать особенности подсистем, подчиненных оптимизаторам. Технические средства, используемые на уровне автоматизированных систем управления и на более высоких уровнях иерархии, должны использовать новейшие технологии, средства высокоскоростной связи и обработки информации.

Уровень координации отвечает за скоординированное управление работой локальных оптимизаторов, которая осуществляется для достижения общей цели всей системы. Для оптимизации используются критерии, позволяющие проводить ее на любом уровне системы.

Уровень принятия оперативных решений учитывает руководящий орган (группу лиц, принимающих решения или интеллектуальное программное обеспечение) для эвристических решений глобальных задач оптимизации на уровне системы. На этом уровне общие цели и задачи системы преобразуются в настройки для более низких уровней иерархии. Также ресурсы управления распределяются между отдельными подсистемами, и принимаются решения для различных чрезвычайных ситуаций.

Традиционная модель управления трафиком имеет ряд существенных недостатков, которые можно устранить, используя подход, предложенный в работе Wu He и др. [18]. Это исследование вносит свой вклад, предлагая новую архитектуру программного обеспечения для облачных данных от транспортных средств в среде IoT, которая обладает способностью интегрировать многочисленные устройства, доступные в транспортных средствах, и устройства, располагающиеся в дорожной инфраструктуре. Тем не менее, исследования по интеграции IoT с облачными данными транспортных средств все еще находятся в зачаточном состоянии, и существующих исследований по этой теме крайне недостаточно.

В работе Al-Sakhan [20] в предлагаемой архитектуре используются ключевые технологии: Интернет вещей, RFID, беспроводная сенсорная сеть (WSN), GPS, облачные вычисления, агентские и другие передовые технологии для сбора, хранения, управления и контроля информации о дорожном движении. Предложенная система может обеспечить новый способ мониторинга транспортных потоков, который поможет улучшить условия движения и использование ресурсов. Кроме того, отдел управления движением, используя информацию мониторинга движения в режиме реального времени, может своевременно обнаруживать потенциально опасные ситуации и предпринимать необходимые действия для предотвращения заторов на дорогах и минимизировать количества аварий, обеспечивая тем самым безопасность дорожного движения.

Обзор технических средств, использующихся для управления дорожным движением

Технические средства управления движением предназначены для инфраструктурного развития дороги и дорожной сети с целью обеспечения заданной организации движения (схемы движения, режима поведения участников движения) и обеспечения безопасности дорожного движения.

Технические средства организации движения на основе назначения делятся на две группы:

1) технические средства, непосредственно влияющие на движение и пешеходные потоки, для формирования их необходимых параметров (дорожные знаки, дорожная разметка, светофоры и направляющие устройства);

2) средства, обеспечивающие работу 1-й группы средств по заданному алгоритму (дорожные контроллеры, транспортные детекторы, средства обработки и передачи информации, оборудование контрольных точек автоматизированных систем управления, диспетчерское оборудование и т. д.).

Основными техническими средствами обеспечения дорожного движения являются:

Дорожные знаки - используются на дорогах и улицах для организации движения и обеспечения безопасности движения, устанавливают определенный порядок или информируют водителей и пешеходов об условиях движения;

Дорожная разметка - линии, надписи и другие знаки на проезжей части и элементах дорожных сооружений, которые устанавливают порядок движения или информируют водителей и пешеходов об условиях движения;

Направляющие - предназначены для обеспечения видимости края обочины, опасных препятствий и разделения транспортных и пешеходных потоков;

Дорожное ограждение - предназначено для предотвращения выезда транспортных средств с проезжей части, а также неконтролируемого выезда пешеходов на проезжую часть;

Светофоры - предназначены для попеременного прохождения участников дорожного движения через участок дорожной сети, а также для выявления опасных участков дорог;

Управляемые дорожные знаки - осуществляют смену символов на дорожном знаке в зависимости от изменения условий движения;

Дорожный контроллер - устройство, предназначенное для коммутации светофоров в соответствии с действующим алгоритмом;

Дорожные контроллеры местного контроля - контролируют дорожную сигнализацию только с учетом условий движения на данном участке дороги и дорожной сети, обмен информацией с диспетчерами дорожного движения других светофоров и центрального пункта управления не предусмотрен;

Дорожные контроллеры системы управления - переключают сигналы светофоров по командам центрального пункта управления или любого контроллера, включенного в систему и выполняющего функции координатора;

Центральный диспетчерский центр - центр, осуществляющий скоординированное управление движением в сегменте дорожной сети;

Транспортные детекторы - предназначены для обнаружения транспортных средств и определения параметров транспортных потоков;

Инструменты видеонаблюдения - предназначены для визуализации информации о параметрах объекта управления.

Также в настоящее время активно внедряются интеллектуальные элементы дорожной инфраструктуры, что позволяет более гибко и эффективно управлять транспортными потоками.

В работе Kanungo и др. [15] рассказывается о системе, которая состоит из видеокамер на транспортных развязках для каждой стороны дороги, как если бы это была четырехполосная развязка. Четыре инфракрасные камеры будут установлены над красными прожекторами, обращенными к дороге. Камеры будут захватывать видео и транслировать его на серверы, где с использованием методов обработки видео и изображений рассчитывается плотность транспортных средств на каждой стороне дороги и применяется алгоритм для соответствующего переключения светофора.

Аппаратное обеспечение также включает в себя подключение этих камер к серверу для получения прямой трансляции и к серверу который способен обрабатывать видеопоток.

Milanes и др. [16] представляют основанную на V2I систему управления движением, которая предлагает решение проблемы регулирования транспортных потоков в городских районах, в которых могут существовать разные ситуации с «бутылочными горлышками». Система помогажет избежать несчастных случаев, заранее предупреждая водителя о возможных столкновениях. Система состоит из интеллектуального контроллера, использующего в качестве нечетких данных на входе: контрольное безопасное расстояние и скорость. Результат обработки, отправляемый водителю, является информацией о том, как движется транспортное средство.

Wang в [17] разработал новую систему Smart Parking (RSP), основанную на Reservation, для оптимизации управления парковкой. В статье была предложена динамическая схема ценообразования для удовлетворения различных потребностей водителей и владельцев парковок, которая основана на информации о свободных парковочных местах в режиме реального времени. Схема ценообразования интегрирована с предлагаемой системой RSP, в которой цена парковки динамически корректируется в зависимости от соотношения между спросом и предложением и уровнем загруженности транспортной сети. Получив цены на парковку, водители делают предварительный заказ, чтобы максимизировать свои преимущества в соответствии с функцией полезности. Основываясь на полученных результатах моделирования, авторы пришли к выводу, что предлагаемая система RSP увеличивает доход для владельцев парковок, обеспечивает дифференциацию услуг для пользователей с различными потребностями, уменьшает заторы, вызванные поиском парковки.

Khanna и др. [19], так же в работе предложила, предоставлять информацию в режиме реального времени о наличии парковочных мест в зоне парковки. Пользователи удаленно могут забронировать парковочное место с помощью мобильного приложения. Исследование направлено на улучшение условий парковки в городе и, следовательно, на улучшение качества жизни его жителей.

Существующие технические средства позволяют полностью решить существующие задачи по организации движения и применять их при разработке новых методов и алгоритмов

управления транспортными потоками. Набор технических средств, алгоритмов и математических моделей для управления движением используется для создания автоматизированных систем управления движением. Эти системы сочетают в себе передовые технологии для эффективного управления трафиком, рассмотрим некоторые из них.

Обзор существующих систем для управления движением

SCOOT

Система SCOOT [3] представляет собой централизованную адаптивную систему, разработанную в TRL. Эта система управления транспортом широко используется по всему миру. Система SCOOT делит зону управления на более мелкие зоны. В пределах каждой зоны обеспечивается сетевая координация светофоров. Границы зон расположены вдоль длинных или слегка нагруженных дорог. Работа системы в значительной степени зависит от данных о трафике, полученных от транспортных датчиков. Система требует большого количества транспортных детекторов, расположенных в заранее определенных местах. Расположение детекторов имеет решающее значение, они обычно расположены в начале дороги (на выезде из соседнего перекрестка) и непосредственно перед линией остановки.

OPAC

Система OPAC [4] выполняет распределенное управление движением на перекрестке в режиме реального времени. Эта система была разработана в Массачусетском университете в Лоуэлле при поддержке Министерства транспорта США в начале 1980-х годов. Система отличается от традиционного метода, контролем длительности фаз светофорного объекта и не использует концепцию цикла. В OPAC алгоритм управления светофором это последовательность решений о переключении через фиксированные интервалы времени. Решение о продлении или прекращении текущей фазы принимается в каждый момент времени.

UTOPIA

Для автоматизации процесса обновления плана работы светофорного объекта был разработан модуль AUT. Этот модуль постоянно собирает данные от транспортных детекторов по всей дорожной сети. Для расчета типовых циклов работы для каждого времени суток данные обрабатываются и подготавливаются для расчета новых. Преимущества, при применении UTOPIA, показывают увеличение скорости транспортного средства в среднем на 15% и увеличение скорости общественного транспорта на 28%, что является приоритетом [6].

SCATS

SCATS [5] вероятно, одна из наиболее совершенных и широко используемых автоматизированных систем управления трафиком. SCATS была разработана Управлением дорожного движения, Нового Южного Уэльса в Австралии. Система настраивает программы для переключения сигналов светофоров в режиме реального времени в зависимости от объема транспортного потока и пропускной способности дорожной сети. Она принимает решение на основе информации от транспортных детекторов, расположенных на каждой полосе непосредственно на перекрестках, перед линией остановки. В мире насчитывается более 50 пунктов управления, из которых более 10 в США.

В работах Stevanovic и др. и Kergaye и др.. [8,9], рассматривая возможности систем SCOOT и SCATS реагировать на изменения параметров движения, они пришли к следующим выводам:

– - SCOOT и SCATS обеспечивают аналогичные транспортные задержки.

– - обе системы способны справиться с преимущественно ненасыщенным транспортным потоком.

– - Длительность циклов светофорного регулирования SCATS более гибкая, в то время как SCOOT имеет тенденцию сохранять длительность цикла в среднем, меньше и дольше.

В исследовании Slavin [10] было установлено, что в целом условия движения до и после установки SCATS значительно различались с точки зрения скорости и пропускной способности. Система показала статистически значимые улучшения скорости трафика на одном

второстепенном перекрестке, даже когда объем движения значительно вырос. На основных перекрестках результаты были неоднозначными и неубедительными.

В работе Doshi и др. [11] OPAC, SCOOT, SCATS рассматривались как три стратегии адаптивного управления движением, каждая из которых имеет свою концепцию управления синхронизацией сигналов светофоров на перекрестках с различными характеристиками. Исследование показало, что с ростом объема трафика на дорожной сети наблюдается, что преимущества, достигаемые с помощью адаптивного управления, уменьшаются при более высоком соотношении объема и пропускной способности. При большом количестве фаз и сильно изменяющемся объеме трафика, системы реагируют медленно, влияя транспортные потоки губительно.

Pavleski и др. в своей работе [12] установили, что эффективность адаптивного управления UTOPIA обеспечивала наилучшие: среднюю длину очереди на перекресток, максимальную длину очереди на перекресток и пропускную способность на перекрестках по сравнению с фиксированным управлением. Общее время в пути на исследуемом участке дорожной сети уменьшается, что указывает на эффект адаптации к различным потребностям движения в зависимости от направления движения.

В области управления трафиком в режиме реального времени известны подходы и решения, направленные на решение проблем: оценка загруженности участков транспортных сетей, технические решения для перенаправления потока трафика по полосам, методы и алгоритмы маршрутизации. Алгоритмы, рассмотренные в работе, часто подвергаются изменениям, но различия в новых заключаются в уменьшении вычислительной сложности или повышении надежности принятого решения. В то же время уже разработанные алгоритмы и архитектуры OPAC, SCATS, SCOOT и UTOPIA имеют достаточные параметры для их непосредственного применения.

Однако в ходе исследования были выявлены такие проблемы в существующих решениях, как:

- медленная реакция на изменение дорожной ситуации;
- сложность доработки и внедрения;
- высокая стоимость существующих решений;
- небольшая зона покрытия.

Заключение

В результате изучения существующих решений как классических так и с использованием IoT подхода, к управлению трафиком, мы обнаружили, что эта перспективная область исследований активно развивается, и многие научные результаты уже получены, но в то же время существующие технические решения не позволяют в полной мере использовать потенциал этой технологии, хотя многие из отмеченных проблем могут быть решены путем применения подхода распределенных систем управления, основанного на концепции IoT. В тех случаях, когда каждый элемент дорожной инфраструктуры является интеллектуальным агентом, представляющим автономную функциональность светофоров, дорожных знаков, элементов разметки и т. д.

Предлагаемый подход позволит:

– распределить вычислительную нагрузку, чтобы найти оптимальную организацию трафика между несколькими агентами;

– повысить гибкость и масштабируемость системы управления трафиком за счет децентрализации;

– улучшить качество управления трафиком, найдя лучшие варианты при переговорах с агентами.

Разработка предлагаемого подхода будет направлением для дальнейших исследований.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90102»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mirshahi M., Obenberger J., Fuhs C. ACTIVE TRAFFIC MANAGEMENT: THE NEXT STEP IN CONGESTION MANAGEMENT. – 2007.
2. Wallace C. E. et al. TRANSYT-7F user's manual. – 1984. – No.UF-TRC-U32 FP-06/07.
3. Hunt, P. B., et al. SCOOT-a traffic responsive method of coordinating signals. No. LR 1014 Monograph. 1981.
4. Gartner N. H., Tarnoff P. J., Andrews C. M. Evaluation of optimized policies for adaptive control strategy //Transportation Research Record. – 1991. – No. 1324.
5. Sims, A. G., and Dobinson, K. W. "The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits." IEEE Transactions on vehicular technology 29.2 (1980): 130-137.
6. Mauro, Vito, and C. Di Taranto. "Utopia." IFAC Proceedings Volumes 23.2 (1990): 245-252.
7. Zhao, Yi, and Zong Tian. "An overview of the usage of adaptive signal control system in the United States of America." Applied Mechanics and Materials. Vol. 178. Trans Tech Publications, 2012.
8. Stevanovic, Aleksandar, Cameron Kergaye, and Peter T. Martin. "Scoot and scats: A closer look into their operations." 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC. 2009.
9. Kergaye, C., Stevanovic, A. and Martin, P. T.. "An evaluation of SCOOT and SCATS through microsimulation." International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation, Transportation and Development Institute, Athens, Greece. 2008.
10. Slavin, Courtney, et al. "Statistical study of the impact of adaptive traffic signal control on traffic and transit performance." Transportation Research Record 2356.1 (2013): 117-126.
11. Ozbay, Kaan, et al. Evaluation of adaptive control strategies for NJ highways. No. FHWA-NJ-2006-001. 2006.
12. Pavleski, Daniel, Daniela Koltovska-Nechoska, and Edouard Ivanjko. "Evaluation of adaptive traffic control system UTOPIA using microscopic simulation." 2017 International Symposium ELMAR. IEEE, 2017.
13. Leontiadis, Ilias, et al. "On the effectiveness of an opportunistic traffic management system for vehicular networks." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 12.4 (2011): 1537-1548.
14. An, Sheng-hai, Byung-Hyug Lee, and Dong-Ryeol Shin. "A survey of intelligent transportation systems." 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. IEEE, 2011.
15. Kanungo, Anurag, Ayush Sharma, and Chetan Singla. "Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing." 2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS). IEEE, 2014.
16. Milanes, Vicente, et al. "An intelligent V2I-based traffic management system." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 13.1 (2012): 49-58.
17. Wang, Hongwei. "A reservation-based smart parking system." (2011).
18. He, Wu, Gongjun Yan, and Li Da Xu. "Developing vehicular data cloud services in the IoT environment." IEEE Transactions on Industrial Informatics 10.2 (2014): 1587-1595.
19. Khanna, Abhirup, and Rishi Anand. "IoT based smart parking system." 2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA). IEEE, 2016.
20. Al-Sakran, Hasan Omar. "Intelligent traffic information system based on integration of Internet of Things and Agent technology." International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA) 6.2 (2015): 37-43.
21. Roess R. P., Prassas E. S., McShane W. R. Traffic engineering. – Pearson/Prentice Hall, 2004.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-330-334

Обухов Павел Серафимович, Веремеев Данил Николаевич

Донской государственный технический университет

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОЙ И ДОСТАТОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ИСКУСТВЕННОЙ НЕЙРННОЙ СЕТИ

Аннотация. *В статье рассматривается проблема идентификации числа нейронов скрытых слоев многослойной ИНС. Рассмотрена методики определения структуры ИНС. Предлагается алгоритм, позволяющий определить необходимое и достаточное число нейронов скрытых слоев многослойной ИНС.*

Ключевые слова: *Многослойная искусственная нейронная сеть, структура искусственной нейронной сети, алгоритм.*

Abstract. *The article deals with the problem of identification of the number of neurons hidden layers of multilayer ANN. Methods of determining the structure of ANN are considered. An algorithm is proposed to determine the necessary and sufficient number of neurons hidden layers of multilayer ANN.*

Одним из широко применяемых инструментов машинного обучения при решении разного рода задач, например, синтеза систем автоматического управления, является задача формирования необходимой и достаточной структуры многослойной искусственная нейронная сеть (ИНС). Широкая применяемость и высокая эффективность многослойной ИНС обуславливают актуальность вызовов, связанных с данным инструментом [1-5].

Проблематика одного из основных неразрешенных вопросов, относящихся к многослойной ИНС, заключается в идентификации ее оптимальной структуры [6,7]. В данной статье этот вопрос рассматривается в плоскости определения оптимального числа персептронов каждого скрытого слоя ИНС.

В основе, представленной в последующем изложенной методики, лежит идея, согласно которой оптимальная структура многослойной ИНС может быть определена исходя из анализа загруженности персептронов ИНС, во время ее динамики.

Методика определения оптимальной структуры многослойной ИНС будет представлена пошагово, на конкретном примере. Исходя из рассматриваемого вопроса, писанного в введен и, под оптимальной структурой многослойной ИНС будем понимать такую структуру увеличения числа персептронов в скрытых слоях которой, не приведет к значимому повышению точности аппроксимации, а уменьшение числа персептронов скрытых слоев которой приведет к значительному повышению ошибки.

Для применения данной методики необходимо обеспечить выполнения ряда требований. Первое – наличие обучающей выборки, объем и качественный состав которой потенциально будет достаточен для обеспечения для выбранной концептуальной модели многослойной ИНС требуемого значения ошибки. Второе – необходимо иметь граничные значения диапазона входящих параметров. В качестве примера будет аппроксимирована зависимость вида:

$$y = \frac{x_1}{2} - x_2 \cdot \frac{\left(x_2 - x_1\right)}{10} \qquad (1)$$

Для аппроксимирования зависимости будет использована многослойна ИНС прямого распространения. Обучение данной ИНС будет осуществляться с использованием алгоритма “обратного распространения ошибки”, который подробно описан в [8].

Работа с ИНС будет осуществляться с использованием среды Matlab и пакета Neural Neuron Tool Box.

Шаг 1. Произвольным образом задаем число слоев и количество нейронов каждого слоя. После чего проводим обучение ИНС. Если работа обученной ИНС не удовлетворительна по степени ошибки, тогда произвольно наращиваем в каждом слое число нейронов, после чего повторяем процесс обучения и проверки ИНС. Если наращивание числа слоев и числа нейронов в каждом слое не позволяет достичь требуемого показателя ошибки, то следует изменить исходные данные или требования, предъявляемые к системе. Если ИНС обеспечила аппроксимацию некоторой зависимости с удовлетворительным показателем ошибки, то следует переходить к следующему шагу.

Для рассматриваемого примера зададим для ИНС 4 слоя, 1 входной 1 выходной и 2 скрытых слоя. Каждый скрытый слой содержит по 10 персептронов, количество нейронов во входном и выходном слое соответствует количеству входные и выходных параметров соответственно. Проведя ее обучение, средняя ошибка аппроксимации при работе ИНС составила 0,5%.

Итог шага 1 – обученная ИНС имеющая избыточное число нейронов в скрытых слоях.

Шаг 2. Количество входных и выходных нейронов совпадает с числом входных и выходных параметров ИНС соответственно. Из чего можно заключить, что количество нейронов внешних слоев ИНС определяется числом вход-выходными параметрами.

Таким образом, вопрос определения рациональной структуры многослойной ИНС сводится к задаче определения оптимального числа нейронов скрытых слоев ИНС. На данном шаге проводится идентификация оптимального числа нейронов слоя.

Каждый слой рассматривается независимо. Рассмотрим процесс определение оптимального числа нейронов для i-го скрытого слоя ИНС. Каждый слой, характеризуется массивом пар $\{x, \alpha\}_k$, число пар определяется удвоенным произведением числа входных сигналов на число нейронов рассматриваемого слоя.

Процесс определения данных пар чисел удобно продемонстрировать на конкретном нейроне слоя. Пусть будет рассмотрен j-й персептрон i-го слоя. Данный персептрон имеет m входов. Каждый из входов характеризуется двумя парами. Рассмотрим вход под номером r. Как и любой другой вход персептрона, он характеризуется двумя парами $\{x, \alpha\}$. Значение α в двух парах одинаково и зависит от коэффициента пропорциональности сигнала k.

$$\alpha = arctg\left(k\right) \tag{2}$$

Расчет параметра x будет производиться по формуле:

$$x = \frac{b_{ji} + U_{ijr}}{k_{ijr}} \tag{3}$$

В формуле (3) k_{ijr} – коэффициента важности r-го входного сигнала j-ого персептрона в i-ом слое, b_{ij} – коэффициент предубеждения j-ого персептрона в i-ом слое, U_{ijr} – величина рассчитываемая как сумма произведений оставшихся (m-1) коэффициентов на их экстремальные значения.

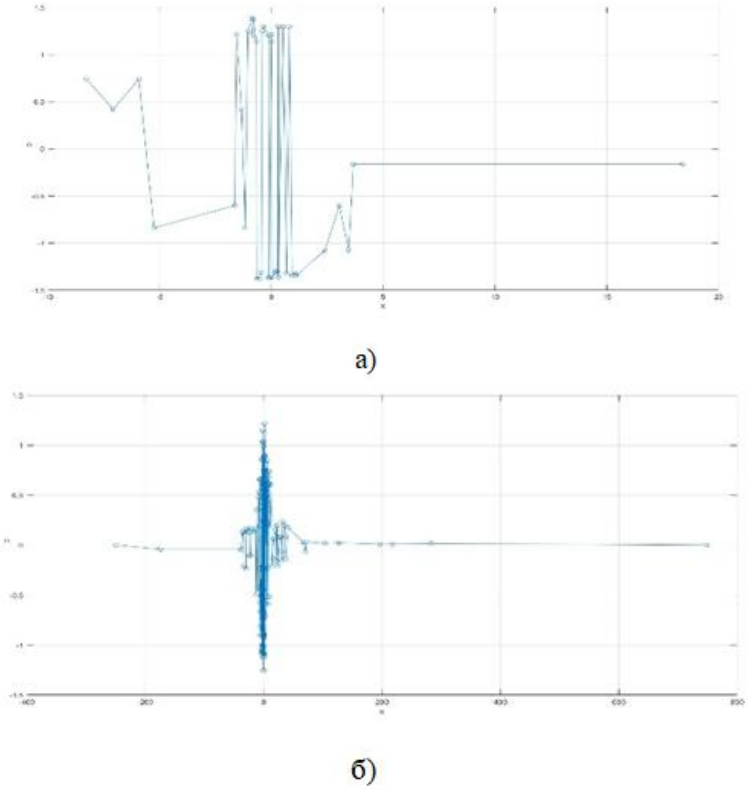
$$U_{ijr}^{max} = k_1 \cdot In_1^{max} + \cdots + k_{r-1} \cdot In_{r-1}^{max} + k_{r-1} \cdot In_{r+1}^{max} \cdots + k_m \cdot In_m^{max} \tag{4}$$

$$U_{ijr}^{min} = k_1 \cdot In_1^{min} + \cdots + k_{r-1} \cdot In_{r-1}^{min} + k_{r-1} \cdot In_{r+1}^{min} \cdots + k_m \cdot In_m^{min} \tag{5}$$

Нахождения максимальных и минимальных значений осуществляется подачей случайных значений на вход ИНС, с последующим анализом динамики, благодаря которому и выделяются экстремальные значения. После того как были проведены расчеты с применение формул (2)-(5), получаем две пары параметров характеризующий вход под номером r. Данная процедура совершается для каждого входа всех нейронов слоя.

Итог шага 2 – массивы значений $\{x, \alpha\}$, характеризующие каждый скрытый слой ИНС.

В качестве формы, удобной для интерпретации, был выбран график в Декартовой системе координат, где ось абсцисс – x, ось ординат – α. Графики для двух скрытых слоев рассматриваемой ИНС приведены ниже (см. Рис. 1).



а)

б)

Рис. 1 Характеристики скрытых слоев ИНС, а) – первого скрытого слоя, б) – второго скрытого слоя.

Шаг 3. На данном этапе происходит удаление избыточных вершин и определение оптимального числа нейронов каждого слоя.

Первоначально определяется приоритет удаления точек. Удобно представить механизм определения параметра приоритетности удаления точки графически (см. Рис. 2).

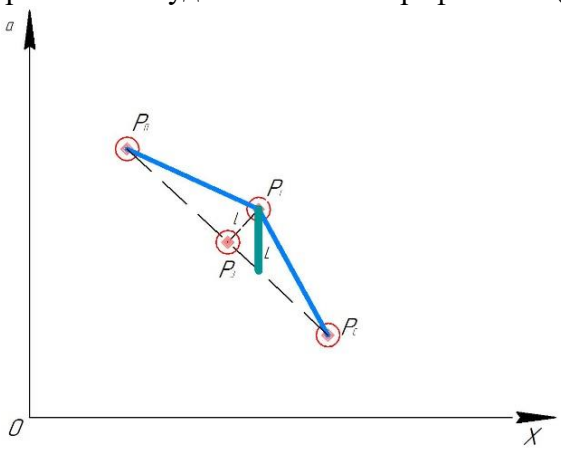


Рис. 2 Геометрическая интерпретация параметра приоритетности удаления точки

Пусть рассматривается некоторая точка Pт, для нее Рп и Рс – ближайшие точки слева и справа соответственно. Чем меньше значение l – тем приоритетнее ее удаление.

$$l = \sqrt{\left(\frac{P_n + P_c}{2} - P_m\right)^2 + \left(\frac{P_n + P_c}{2} - P_m\right)^2} \qquad (6)$$

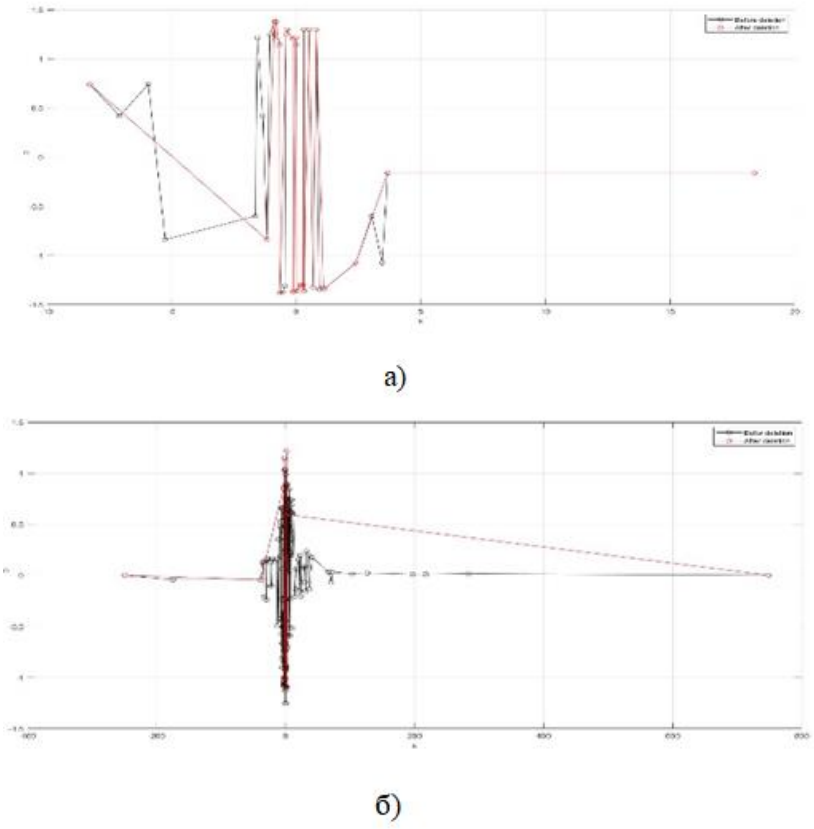
При удалении точки абсолютное значение α ближайших вершин изменяется с сохранением знака на величину:

$$L = \frac{\alpha_{P_n} - \alpha_{P_c}}{x_{P_n} - x_{P_c}} \cdot \left(x_{P_m} - x_{P_n} \right) + \alpha_{P_n} \quad (7)$$

Величина L распределяется между соседними вершинами пропорционально их удалённости от Pт. При этом измененное значение $|\alpha|$ для соседних вершин не должно превышать $\frac{\pi}{2}$.

Для рассматриваемого примера отредактированные характеристики представлены на Рис. 3. Из них следует, что для аппроксимации рассматриваемой зависимости (1), будет достаточно в первом скрытом слое шести нейронов, а во втором одного.

Итог шага 3 – определение необходимого числа нейронов скрытых слоев ИНС.



а)

б)

Рис. 3 Оптимизированные характеристики скрытых первого (а) и второго (б) скрытых слоев ИНС.

Шаг 4. На данном этапе проводится синтез и обучение новой ИНС, с расчетным числом нейронов каждого слоя. Для рассматриваемого примера ошибка работы, оптимизированной ИНС по сравнению с исходной, не изменилась, ошибка составила: 0,5 %.

Данная работа рассматривает метод по оптимизации структуры многослойной ИНС. Очевидно, что ее цель направлена на исключения избыточности нейронов в слоях ИНС. С практической точки зрения, уменьшение числа нейронов приведет к уменьшению совершаемых действий вычислительным устройством необходимых для одной итерации ИНС. Как следствие повыситься быстродействие и уменьшится число потребляемых ресурсов, без ущерба качества функционирования ИНС. Таким образом описанный метод может использоваться для рационализации структуры многослойной ИНС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаповалова, А.В. Практическое применение искусственных нейронных сетей в обработке графической информации / А.В. Шаповалова // Молодой ученый. – 2017. – №10. – С. 41.-43.

2. Абрагин, А.В. Перспективы развития и применения нейронных сетей / А.В. Абрагин // ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ. – 2015. – №12(42). – С. 12.-14.

3. Богославский, С.Н. Область применения искусственных нейронных сетей и перспективы их развития / С.Н. Богославский // Научный журнал КубГау. – 2007. – №27(3). – С. 2-11

4. Талалаев, А.А. Анализ эффективности применения искусственных нейронных сетей для решения задач распознавания, сжатия и прогнозирования / А.А. Талаев, И.П. Тищенко, В.П. Фраленко, В.М. Хачумов // ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЕКТ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ. – 2008. – №2. – С. 24-33

5. Michelucci, U. Applied Deep Learning / U. Michelucci. – Dübendorf., apress, 2018. – 425 с.

6. Фатхи, Д. В. Методика определения оптимального числа нейронов выходного слоя сети Кохонена при решении задач кластеризации / Д.В. Фатхи, В.В. Галушка // Информационная безопасность регионов. – 2011. – №2(9). – С. 41-44

7. Царегородцев, В.Г. Определение оптимального размера нейросети обратного распространения через сопоставление средних значений модулей весов синапсов / В.Г. Царегородцев // Материалы XIV Международной конференции по нейрокибернетике. – 2005. – Т.2. – С. 60-64

8. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский, И.Д. Рудинский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-335-340

Поленов Максим Юрьевич, Курмалеев Артем Олегович,
Пуховский Валерий Николаевич

Южный федеральный университет

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Аннотация: *В работе рассмотрен подход к повторному использованию и трансляции исходного кода моделей с языков программирования и моделирования. Было рассмотрено и проанализировано состояние исследований и средств в области повторного использования моделей при моделировании сложных систем. Средства интеллектуализации были проанализированы с точки зрения применения к задаче трансляции моделей. В качестве средства интеллектуальной поддержки такой трансляции была выбрана экспертная система.*

Ключевые слова*: средства моделирования, повторное использование моделей, трансляция кода моделей, Мультитранслятор, распределенная библиотека моделей, экспертная система*

Abstract: *In this paper, the approach to reuse and translation of models' source code from programming and modeling languages was discussed and reviewed. The current state of research and tools for the reuse of the models' code while complex systems simulation was considered and analyzed. Intelligent tools were analyzed in terms of application to the task of models' translation. The expert system was chosen as an intelligent support of such translation.*

Keywords*: modeling tools, model reuse, translation of models' code, Multitranslator, Distributed Storage of Models, expert system*

Введение

Со времени разработки первого инструмента моделирования сложных систем разработчики и исследователи создали большое количество различных моделей, используя соответствующие средства и языки моделирования или визуальные интерфейсы. Работа над некоторыми классическими средствами моделирования была прекращена из-за появления современных пакетов с новыми функциями. Это привело к затратам времени на создание новых моделей для новых средств моделирования.

Все вышеизложенное привело к необходимости разработки инструментов трансляции, которые позволят не тратить время на воссоздание ранее разработанных моделей для других пакетов моделирования. Для решения данных задач был создана инструментальная среда трансляции – Мультитранслятор (МТ) [1]. МТ может транслировать код модели с исходного языка на язык вывода в требуемом формате. Но, чтобы запустить эту трансляцию, необходимо создать соответствующий трансляционный модуль [1] (с входного языка на выходной), написанный на внутренних языках МТ для грамматик и описания сгенерированного кода [2].

В итоге, этот автономный инструмент для перевода моделей с языков программирования с графическим интерфейсом требует индивидуальной установки на ПК, а также необходим исследователь, который понимает специфику обрабатываемых языков и самого МТ. МТ способен перевести многие из ране созданных моделей, что сокращает временные затраты при конвертации этих моделей.

Сначала МТ было решено перевести на модель клиент-сервер [3] с другой версией пользовательского интерфейса, ориентированной только на трансляцию моделей на клиенте, а само ядро МТ перенести на сервер. Мы столкнулись с проблемой совместного использования и

хранения наших моделей, так как архитектура была разделена, и поэтому были добавлены базы данных моделей с обеих сторон. Кроме того, поскольку обработка была перемещена на сервер, что снова сократило временные затраты при обработке кода большой модели благодаря большей мощности сервера, по сравнению с ПК. Также это сократило затраты времени для новых пользователей на изучение МТ с его сложным графическим интерфейсом. Эти инструментальные средства были разработаны и получили название «Распределенная библиотека моделей» [4].

Однако, в процессе трансляции моделей возникали некоторые неопределенные ситуации [2], которые требовали от разработчика модели выбора между возможными направлениями генерации целевого кода. Благодаря разнообразным трансляционным модулям МТ и многообразию языков, решение таких проблем становится емким по времени как для разработчиков, так и в случае поиска эксперта языка моделирования для каждого конкретного случая.

Некоторое время осуществлялся поиск подходящего решения, которое было бы функциональным, так и доступным с точки зрения временных затрат на его разработку и поддержку. В итоге было проанализировано применение интеллектуальных средств и сами средства, поскольку эксперт использовал свой собственный интеллект и знания, чтобы сделать правильный выбор.

После пересмотра современных средств интеллектуализации и некоторых обсуждений мы выбрали экспертную систему и базу знаний в качестве такого решения [5, 6] для этой конкретной задачи. Разработка первой предварительной версии экспертной системы на практике подтвердила снижение затрат по времени по результатам первых испытаний [7].

Состояние исследования языковой трансляции моделей

Прежде чем говорить об интеллектуальных средствах, необходимо рассмотреть существующие подходы к повторному использованию и транслированию моделей, используемому при синтезе современных сложных систем.

Один из подходов рассматривает модели как артефакты знаний, которые могут служить основой для будущего науки и техники [8], в чем наши подходы, в некоторой степени, похожи. Кроме того, в нем говорится об автоматизации повторного использования моделей, как и в нашем случае. Исследователи разделяют повторное использование моделей на основе представления моделирования на четыре области:

1. Мультиформализм, масштабируемое моделирование;
2. Повторное использование в различных сообществах, имеющих заинтересованность в этом вопросе и применение;
3. Использование модели и симуляция веб-сервисов;
4. Качественно-ориентированные подходы к оценке компонентов.

Где по первому пункту исследователи утверждают, что для реализации повторного использования в этой области необходимо использовать новые подходы для разных приложений и компонентов.

Во втором пункте утверждается, что, чем выше уровень абстракции для повторного использования, тем проще и лучше достижимы результаты [8]. Особенно это зависит от подходов к применению. Например, если мы возьмем самый низкий уровень достижимости, уровень языков программирования, это также зависит от парадигм, используемых в языках ввода и вывода. То есть, если язык исходного кода создан с использованием объектно-ориентированного подхода, а выходной язык не поддерживает такую парадигму, то невозможно будет сгенерировать выходной код аналогичным способом. Таким образом, утверждается, что полное повторное использование возможно только с использованием новых методологий, подходов и методов.

С помощью веб-сервисов при разработке на основе компонентов можно решить эту проблему, но существует еще одна проблема совместимости как на уровне программного, так и на аппаратном уровне в сочетании с перегруженным кодом и отсутствием стандартов из-за отсутствия общей структуры и документации. В итоге исследователи [8] прямо называют веб-сервисы единственным решением для повторного использования.

И последний пункт описывает, что в текущем состоянии приложение может быть повторно использовано при выполнении двух условий:

– ─ поддерживаемое в достаточной мере для предполагаемого использования, для которого оно создано;

– ─ должно соответствовать предполагаемому использованию имитационной модели, в которую она будет интегрирована.

Авторы также утверждают, что крайне важно производить повторное использование с ориентацией на качество, а не на точность. В объяснении говорится, что есть и другие важные показатели, которые не включены в подход, ориентированный на точность, такие как адаптивность, компоновка, расширяемость, функциональная совместимость, пригодность к поддержке, модифицируемость, открытость, производительность, оценка повторного использования, масштабируемость и удобство использования [8].

Итогом исследования является использование анализа больших данных и пирамиды управления информацией и знаниями (DIKM) с использованием управления знаниями в качестве решения для повторного использования моделей. За исключением глубокого обзора самой пирамиды, исследование предлагает несколько решений для различных задач, с которыми можно столкнуться при решении проблемы повторного использования:

– Машинное обучение. Может использоваться для мониторинга и проверки текущего моделирования, сортировки моделей и создания баз моделей с метками. Кроме того, он может проверять базовую синтаксическую и семантику кода моделей, чтобы узнать, написана ли повторно используемая модель в соответствии с основами языка.

– Управление контекстом. В документе говорится, что в контекстной структуре может быть список атрибутов контекста, который, по-видимому, содержит такие атрибуты, как предположения, ограничения, намерения и т. д. [8]. Это должно помочь исследователям принять правильное решение для каждой модели при повторном использовании.

– Расширение предметных знаний для совместной работы и расширенного принятия решений. В нем говорится, что валидность для повторного использования может рассматриваться как процесс, состоящий из двух частей: оценка результатов и вывод о достоверности результатов, которые могут улучшить код выходных моделей.

– Повторное использование через «открытие» модели. Для этой задачи «открытие» [9] может быть достигнуто только с помощью согласованных и соответствующих метаданных, которые возможны только при правильной маркировке и разметке.

Другое исследование также применяет управление знаниями вместо того, чтобы использовать знания, которые должны быть извлечены из данных [10]. При таком подходе данные физической модели, основанные на языке Modelica, представляются в виде универсальной модели знаний RSHP [10].

Он формирует необходимые модели из кода для повторного использования в будущем, что делает MT, но во внутреннем специфическом формате. Он применяется для веб-приложений и повторного использования языка программирования с определенным языком вывода [10].

В целом это представляет собой картину отсутствия трансляции формальных языков для моделей в текущих исследованиях, на основе подхода повторного использования знаний, что базируется на знаниях о самих моделях и языке, который использовался для его написания. Кроме того, никто не ориентируется на автоматизацию для генерации необходимых моделей. Даже когда уже существует огромное количество написанных моделей на множестве языков.

Все вышеперечисленное привело к необходимости совершенствования нашей системы для будущих работ и исследований.

Анализ применения интеллектуальных средств

Анализ языка

Модели и код всегда пишутся на формальном языке, который построен с набором правил с набором слов.

Для начала рассмотрим основные свойства формальных языков:

1. Генерируется некоторой формальной грамматикой;
2. Описано или соответствует регулярному выражению;
3. Принимается неким автоматом;
4. Принимается по процедуре принятия решения.

Последний пункт близок по функционалу, но необходимо рассмотреть, какие есть современные интеллектуальные инструменты.

Анализ интеллектуальных средств

В результате анализа множества решенных научных задач и проблем, существует список подходов и инструментов, которые были использованы для их решения. Они уже применяются на практике от роботизированных систем и видеоигр до автоматического вождения автомобиля и диагностики различных заболеваний.

Более того, средства также многочисленны, как и список применений, и необходимо учитывать, подходят ли они для текущей задачи.

Поиск и оптимизация

Эти средства включают в себя математическую оптимизацию, поисковые алгоритмы и эволюционные вычисления.

Оптимизационная часть могла бы решить проблему путем формализации всего в математические функции, которые должны найти наилучшее значение соответствующей изменчивости, чтобы соответствовать результату, но это определенно очень сложно формализовать и развить. Кроме того, он требует многократного выполнения процесса каждый раз, когда мы меняем язык ввода или вывода, поскольку функция привязана к точному набору поддерживаемых языков.

Можно также использовать алгоритмы поиска, но для каждой конкретной пары языков требуется много вычислительных ресурсов и даже конкретных алгоритмов поиска, как и для алгоритмов оптимизации из-за изменения правил.

Эволюционные алгоритмы требуют большого количества вычислений из-за большого разнообразия языков с различными критериями. Каждый язык должен быть обработан сам по себе, и даже какое-либо небольшое изменение испортит результат, как и для всех этих трех подходов.

Нейросети, классификаторы и методы статистического обучения

Нейросети, являясь симуляцией нейронов человеческого мозга, могут быть применены только к задачам, которые могут быть формализованы весовыми функциями, и им нужно учиться на множестве примеров. В результате необходимо переделать сети для каждой конкретной пары языков. Поскольку наша задача определяется алфавитом и правилами, поэтому нет необходимости определять, что делает процесс обучения точным, но бесполезным, так как мы уже знаем правила. Кроме того, теоретически это может привести к случайным и неточным результатам в некоторых случаях.

Классификаторы могут выполнять эту работу, поскольку они обучены методам статистического и машинного обучения на заданном наборе данных. Однако, основная работа по классификации и переводу нашей задачи уже выполнена МТ. Более того, машинное обучение является разновидностью нейронной сети, поэтому все вышесказанное относится и к ней.

Вероятностные методы для нечетких объяснений

Инструменты для этой группы взяты из теории вероятностей, поскольку основным случаем использования является неопределенность. Опять же, мы определили правила формальных языков для ввода и вывода, что делает вероятностные алгоритмы одновременно очень сложным и несовместимым решением.

Необходимо сказать, что Байесовские сети также работают в большинстве случаев хуже, чем классификаторы для большинства прикладных данных, поэтому даже выбор между этими двумя категориями никогда не падет на них.

Логическое программирование и автоматизированное объяснение

Эта тема столь же широка, как и вторая в этом разделе, и включает в себя огромное разнообразие средств. Логика соответствует предопределенным правилам формальных языков, поскольку нет необходимости определять правильные данные, когда они уже предоставлены.

Кроме того, логика может обрабатывать данные в автоматическом режиме, если в процессе принятия решений существует набор правил, который соответствует всем нашим критериям одновременно.

Вывод

Сейчас в заранее определенных задачах, таких как перевод, всегда есть профессионалы-эксперты, которые обладают глубокими знаниями об определенной области. Поэтому целесообразно объединить и использовать их знания. Данный подход основан на использовании базы знаний, а инструментом будет экспертная система, которая обрабатывает все правила, хранящиеся в базе знаний.

Заключение

Данная работа представляет собой краткий обзор и анализ текущего состояния проблемы повторного использования моделей. Все вышеизложенное привело к выбору инструментальных средств – экспертной системы, подходящих по всем критериям решения.

Результаты этой работы составляют основу для будущих разработок и исследований по применению интеллектуальных средств для мультиязыковой трансляции моделей.

Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00936.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернухин Ю.В., Гузик В.Ф., Поленов М.Ю. Многоязыковая трансляция средств виртуального моделирования. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 368 с.
2. Chernukhin, Yu., Guzik, V., Polenov, M. Multilanguage Translation Usage in Toolkit of Modeling Systems // WIT Transactions on Information and Communication Technologies, WIT Press, 2014, vol. 58, pp.397-404.
3. Tanenbaum, E., Van Sten, M. Distributed Systems: Principles and Paradigms, 2nd ed., Prentice-Hall, 2006.
4. Polenov M., Guzik V., Gushanskiy S., Kurmaleev A. Development of the Translation Tools for Distributed Storage of Models // Proceedings of 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT 2015), IEEE Press, 2015, pp.30-34.
5. Polenov M., Guzik V., Gushansky S., Kurmaleev A. Intellectualization of the Models Translation Tools for Distributed Storage of Models // Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing (Proceedings of 16-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016)), vol.1, STEF92 Technology, 2016, pp. 255-262.
6. Polenov M., Gushanskiy S., Kurmaleev A. Synthesis of Expert System for Distributed Storage of Models // Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 575, Springer, 2017, pp.220-228.

7. Polenov M., Kurmaleev A., Gushanskiy S. Synthesis of Intellectual Tools to Support Models Translation for Mobile Robotic // Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 763, Springer, 2019, pp.282-291.

8. Fujimoto, R., Bock, C., Chen, W., Page, E., Panchal, J.H. Research Challenges in Modeling and Simulation for Engineering Complex Systems. (Simulation Foundations, Methods and Applications Series). Springer, 2017.

9. Gallego E., Álvarez-Rodríguez J.M., Llorens J. Reuse of Physical System Models by means of Semantic Knowledge Representation: A Case Study applied to Modelica // Proceedings of the 11th International Modelica Conference, 2015, pp. 747-757.

10. Sander M., Developing Interacting Domain Specific Languages, Universiteit Utrecht, 2007.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-341-345

Гушанский Сергей Михайлович, Потапов Виктор Сергеевич

Южный федеральный университет

МЕТОДИКА КВАНТОВОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ОБЪЕКТОВ

Аннотация. *Представленная статья посвящена описанию основ теории квантовых вычислений в области квантовых алгоритмов и распознавания объектов. Рассмотрены основные квантовые операторы, действующие на квантовые когерентные состояния. Предложена общая структура квантового алгоритма и его задачи, а также схематическая диаграмма моделирования работы квантового алгоритма распознавания объектов и лиц на классическом вычислительном устройстве. Рассмотрены основные подходы к моделированию квантовых алгоритмов, их достоинства и недостатки. Целью данной работы является изучение существующих алгоритмов распознавания образов и создание эффективной модели распознавания с помощью свойств и методов квантовых вычислений.*

Ключевые слова: *квантовый алгоритм; запутанность; модель квантового вычислителя; квантовый параллелизм; кубит, распознавание образов.*

Annotation. *The presented article is devoted to the description of the fundamentals of the theory of quantum computing in the field of quantum algorithms and object recognition. The basic quantum operators acting on quantum coherent states are considered. The general structure of the quantum algorithm and its tasks, as well as a schematic diagram of the modeling of the quantum algorithm for recognizing objects and faces on a classical computing device, are proposed. The main approaches to modeling quantum algorithms, their advantages and disadvantages are considered. The aim of this work is to study existing pattern recognition algorithms and create an effective recognition model using the properties and methods of quantum computing.*

Keywords: *quantum algorithm; confusion; quantum computer model; quantum parallelism; qubit, pattern recognition.*

Введение

Квантовые вычислительные системы [1] способны решать задачи, которые не под силу классическим машинам. Такие не являются средством повышения производительности каких-либо приложений, тем не менее, можно выделить сферы, в которых они могли бы совершить революцию. Среди таких областей квантовая химия, материальные науки, машинное обучение [2] и криптография [3]. Экспериментальные устройства, содержащие около 50 кубитов в скором времени будут доступны и смогут выполнять четко определенные вычислительные задачи [4], которые требовали бы самых мощных классических суперкомпьютеров. Вычислительные устройства квантовой природы могут быть использованы в некоторых системах комплекса охраны периметра.

А именно: квантовые алгоритмы генерации ключей и кодирование (шифрование на квантовом уровне) потока взаимодействий охранных роботов-агентов с целью защиты информации от несанкционированного доступа и исключения вероятности ее подмены в процессе обмена между агентами, между агентом и базой. Характерным примером использования преимуществ квантовых вычислений является алгоритм генерации секретного ключа [5]. Однако дабы не повторять ошибок прошлого в области вычислительных систем, необходимо уже на данном, подготовительном этапе определиться с оптимизационными, теоретическими и практическими вопросами, стоящими перед квантовыми вычислительными устройствами и их компонентами. А именно, квантовые схемы [6], оптимизация распределения

вентилей и кубит [7], что сократит число связей в многоузловой настройке и число k-кубитных ядер с вентилями на уровне одного узла.

Немаловажным достоинством также будет служить сокращение тактового цикла работы квантовой схемы. Встает задача моделирования квантовых гейтов и схем с квантовым шумом [8] и анализом точности. Наиболее необходимых свойств квантовых вычислений в области систем комплекса охраны периметра является способность к кодированию (шифрованию) и сжатию передаваемой информации одновременно.

Реализация алгоритма распознавания объектов

Все больше внимание и интереса в настоящее время уделяется решению задач, связанных с распознаванием объектов [9] и лиц. В большей степени данное событие кореллируется с многочисленными потребностями и большим потенциалом области распознавания различного рода объектов. Ниже представлен далеко не полный перечень применимости области распознавания объектов для решения разных практических и теоретических задач:

- VR, игры на ПК;
- Учет иммигрантского потока;
- Системы для охраны периметра;
- Кодирование больших объемов данных;
- Помощь в криминалистики;
- Е-коммерция и др.
- Взаимодействие между ПК и пользователем;

Алгоритм распознавания объектов требует разложения на некоторое количество промежуточных этапов. Раскроем с большим количеством деталей все этапы, изображенные на рис. 1, процесс распознавания объектов в рамках изображения представлен рядом следующих шагов. На рис. 1 приведена обобщенная последовательность этапов в процессе работы предложенного алгоритма.

Рис. 1. Обобщенная схема распознавания объектов

Характерной особенностью всех этапов является вывод определенного объекта или их группы,которые задействованны на последующих этапах:

1. Предобработка всего изображения (фотографии), что позволит привести его в требуемый вид для распознавания. Происходит процесс выделения числа кубитов, создание квантового регистра [10]. Для начала работы необходимо определить количество кубитов/регистров;

2. Создание пустой квантовой схема. Происходит выполнение инициализации квантовой схемы, ввод числа ветвей регистра, добавление гейтов и инициализация готовой схемы; На данном этапе также происходит ряд оптимизаций схемы: распределение вентилей и кубит. Необходима оптимизация схемы, направленная на уменьшение «шагов» связи и использование точных и более эффективно настроенных ядер. Существуют различные варианты оптимизации распределения вентилей и кубит на основе схем «квантового превосходства».

Оптимизации носят общий характер и могут применяться в любой квантовой цепи. Фактически, схемы «квантового превосходства» могут быть спроектированы таким образом, который является наименее подходящим для данных видов оптимизации производительности. На данном шаге работы алгоритма выполняется компоновка набора элементов готовой схемы. Построение таких случайных, низкоуровневых квантовых схем показано на рис. 2.

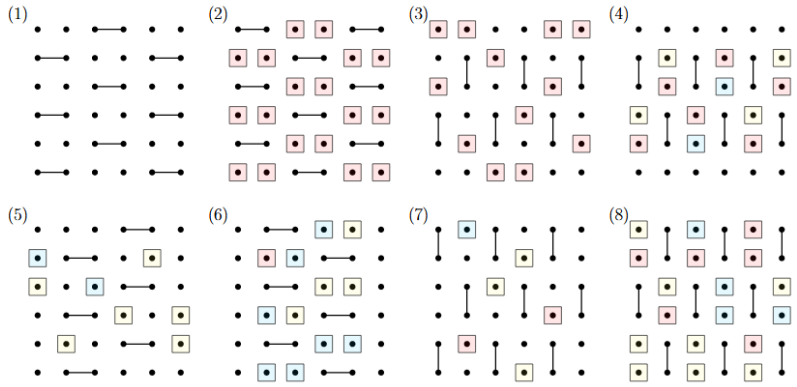


Рис. 2. Низкоуровневая случайная квантовая схема

Схемы созданы для использования в составе квантовой вычислительной архитектуры с двунаправленной связью [11]. Все возможные двухкубитные вентили [12] применяются в пределах 8 циклов,

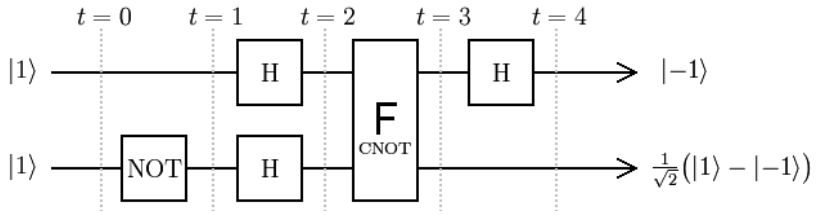


Рис. 3. Квантовая схема

$t = 0 :| \varphi(0) >=| 1 >| 1 >=| 1,1 >$

$t = 1 :| \varphi(1) >=| 1 >| -1 >=| 1,-1 >$

$$t = 2 :| \varphi(2) >= \frac{1}{2} \cdot (| 1,\ f(1) > + | -1,\ f(-1) > - | 1,-f(1) > + | -1,1 > - | 1,-1 > - | -1,-1 >)$$

$$t = 3 :| \varphi(3) >= \frac{1}{2} \cdot (| 1,\ f(1) > + | 1-1,\ f(-1) > - | 1,-f(1) > - | -1,-f(-1) >) =$$

$$\frac{1}{2} \cdot (| 1,1 > + | -1,-1 > - | 1,-1 > - | -1,1 >) = \frac{1}{2} \cdot (| 1 > - | -1 >) \cdot (| 1 > - | 1 >)$$

$$t = 4 :| \varphi(4) >= \frac{1}{2} \cdot H \cdot (| 1 > - | -1 >) \cdot (| 1 > - | -1 >) =| -1 > \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (| 1 > - | -1 >)$$

3. Выделение (обнаружение) необходимых объектов на изображении (фотографии);

4. Выделение и последующее шифрование/кодирование необходимых характеристик объектов из изображения (фотографии);

5. Сравнительный анализ полученных результатов из изображения (фотографии) с объектами, хранящимися в базе данных [13], вывод в процентном соотношении показателя достоверности распознавания требуемого объекта.

Рис. 4. Алгоритм распознавания объектов

Каждый шаг в квантовой схеме может быть выполнен многообразием методов. Часть алгоритмов используется паралельно на нескольких шагах в процессе распознавания объектов.

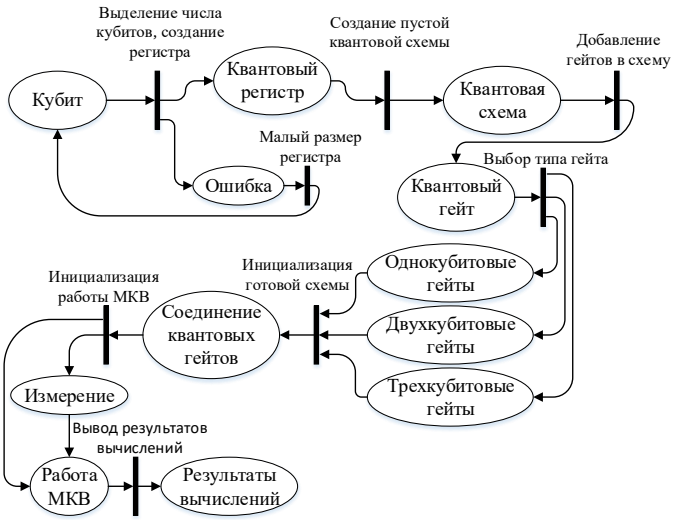


Рис. 5. Реализация алгоритма распознавания объектов

Эффективность выполнения методики распознавания объектов анализируется и оценивается с помощью качества процессам распознавания. Определяется благодаря доступным методам и алгоритмам оценивания изображения (фотографии) в совокупности с быстротой вычислительного процесса всех алгоритмов [14]. Быстродействие в данном случае эквивалентно качеству программной разработки и аппаратных компонентов [15].

Проблемой, которая возникает при распознавании объектов на изображении (фотографии), является присутствие в комплексе изображения вариативности с точки зрения лиц и объектов, таких как расы, пол человека, набор эмоций, степень освещенности окружающей

среды, положение туловища и головы, а также наличие инородных предметов (очки, усы, зажмуренные глаза и др.).

Заключение

В результате выполнения данной работы были исследованы квантовые алгоритмы, необходимые для распознавания объектов; описаны достоинства и недостатки, а также перспективы применения квантовых вычислений в области распознавания объектов. Выполнена реализация алгоритма распознавания объектов, а также квантового алгоритма визуальной криптографии для увеличения вероятности получения верного результата всего вычислительного процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № НК 19-07-01082.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев, К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления [Текст] / К. А. Валиев // Успехи физических наук // Обзоры актуальных проблем, 2005. – Т. 175, №1. – 39 с.
2. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва: Изд-во “Физматлит”, 1986. – 544 с.
3. Машинное обучение // Википедия [2017 – 2017]. Дата обновления: 03.09.2017. – URL: http://ru.wikipedia.org/?oldid=87412528 (дата обращения: 03.09.2017).
4. Гузик, В. Ф. Квантовый компьютинг [Текст] / В. Ф. Гузик, С. М. Гушанский, Е. В. Ляпунцова. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. – 120 с.
5. D. Boneh and R. J. Lipton Quantum cryptanalysis of hidden linear functions. In Don Coppersmith, editor, CRYPTO '95, Lecture Notes in Computer Science, pages 424-437. Springer-Verlag, 1995.
6. Bernstein, E., Vazirani U. Quantum complexity theory. In Proceedings of the 25th ACM Symposium on the Theory of Computing, pages 11-20, 1993.
7. Нильсен, М. Квантовые вычисления и квантовая информация = Quantum Computation and Quantum Information [Текст] / М. Нильсен, И. Чанг. – Москва: Мир, 2006.
8. Barends, R. et al., "Coherent Josephson Qubit Suitable for Scalable Quantum Integrated Circuits," Phys. Re. Lett., 111, (2013), doi:10.1103/PhysRevLett.111. 080502, arXiv:1304:2322.
9. Ricks, B. Training a Quantum Neural Network. B. Ricks, D. Ventura. – URL: http://papers.nips.cc/paper/2363-training-a-quantum-network.pdf (дата обращения: 20.03.2016).
10. Kak, S. On Quantum Neural Computing // Inf. Sci. – 1995. – Vol. 83. – P. 143 – 160.
11. Алтайский, М. В. Квантовые нейронные сети: современное состояние и перспективы развития [Текст] / М. В. Алтайский, Н. Е. Капуткина, В. А. Крылов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2014. – № 5 – 6, Т. 45, – С. 1825 – 1860.
12. Гузик, В. Ф. Проектирование высокопроизводительных проблемно-ориентированных вычислительных систем [Текст]: монография / В.Ф. Гузик, Е.В. Ляпунцова, М.Ю. Поленов, Д.А. Беспалов; Южный федеральный университет. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2016. – 556 с.
13. Гузик, В. Ф. Разработка системы требований к архитектуре квантового вычислителя [Текст] / В. Ф. Гузик, С. М. Гушанский, В. С. Потапов // Национальная ассоциация ученых (НАУ) # I (6), 2015 / Технические науки. – Екатеринбург, 2015. – С.127 – 130.
14. Kim, Y.H., Kulik S.P., Chekhova M.V., Grice W.P. Experimental entanglement concentration and universal Bell-state synthesizer // Phys. Rev. A., 2003, Vol. 67, 010301; quant-ph/0209041 v3, 2002.
15. Eckert, A., Jozsa R. Quantum Computation and Shor’s Factoring Algorhitm, Rev. Mod. Phys. 68(3), 733-753 (1996).

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-346-351

Самойлов Алексей Николаевич, Кучерова Маргарита Сергеевна, Сергеев Николай Евгеньевич

Южный федеральный университет

ПОДХОД К ПОЛУЧЕНИЮ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КАМЕРЫ МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Аннотация: *Одним из направлений технологий распознавания образов и обработки изображений является прикладная фотограмметрия. Применение её методов на практике связано с поиском баланса между мобильностью, автономностью и качеством измерения. Одним из факторов, препятствующих совмещению данных характеристик является ограниченная возможность камер мобильных устройств. В статье предлагается алгоритм получения снимков высокого разрешения с использованием камеры мобильного устройства, основанный на использовании слоев-масок, выделяемых из снимка общего плана измеряемого объекта.*

Ключевые слова: *фотограмметрия, мобильное устройство, снимок высокого разрешения, алгоритм, подход*

Abstract: *One of the areas of pattern recognition and image processing technologies is applied photogrammetry. The application of its methods in practice is connected with the search for a balance between mobility, autonomy and quality of measurement. One of the factors preventing the combination of these characteristics is the limited ability of cameras of mobile devices. The article proposes an algorithm for obtaining high-resolution images using the camera of a mobile device, based on the use of mask layers extracted from the image of the general plan of the measured object.*

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00577 А.

Введение

В задачах фотограмметрии изображения являются основным источником информации об измеряемом объекте. От этого, соответственно, зависит качество получаемых результатов. В случае, когда задачи фотограмметрии имеют цикличный характер и связаны с выполнением операций подсчета возникает дополнительная проблема, обусловленная обратной зависимостью между качеством снимка и характеристиками фоторегистрирующего устройства.

Так, в задачах подсчета лесной и трубной продукции [1,2] основополагающими характеристиками устройства являются вес и время автономной работы. Представленные в данной сфере средства являются попыткой исследователей и разработчиков найти компромисс между габаритами и эффективностью измерительной техники.

Основная проблема применения фотограмметрических методов измерения – ограничения в производительности устройств, выполняющих обработку изображений. Разработчикам приходится искать компромисс между качеством используемой фототехники, вычислительной мощностью и точностью алгоритма. Первый критерий определяет вычислительную сложность алгоритма и нагрузку на устройство, выполняющее обработку изображения. Увеличение качества фототехники ведет к удорожанию измерительной установки, снижению ее мобильности и энергонезависимости. Как правило компромисс находится в применении цифровых зеркальных фотокамер и производительного ноутбука. Подобные системы обеспечивают погрешность измерений не выше 10% [1].

Таким образом, основным фактором, препятствующим обеспечению высокой мобильности измерительных комплексов, являются ограниченные возможности камеры

мобильных устройств. Решение данной проблемы может рассматриваться в двух плоскостях: повышение качества путем обработки готового снимка и повышение качества снимка. Подавляющее большинство исследований посвящены первой плоскости, то есть разработке методов и алгоритмов постобработки изображений, направленных на улучшение их качества. В отличие от таких решений, в статье рассматривается подход к повышению качества исходного снимка.

Современное состояние науки

Вопросы повышения качества цифровых изображений, снятых портативными устройствами являются одними из активно разрабатываемых исследователями по всему миру.

В работе [3] предложен подход, основанный на повышение разрешения изображений магнитно-резонансной томографии, авторами предложен новый математический аппарат и алгоритм, позволяющий получать изображения сверхвысокого разрешения.

Авторы работы [4] предложили алгоритм, позволяющий устранять размытие и слабую освещенность на снимках, полученных с помощью камеры мобильного телефона. В свою очередь в статье [5] предложен нейросетевой алгоритм, позволяющий комплексно повышать качество снимка до уровня цифровых зеркальных камер.

Повышению качества снимков высокого разрешения посвящена работа [6], в которой предлагается подход мозаичного смешения снимков, сделанных устройствами различного типа.

Обработка и улучшение снимков любого вида рассматривается авторами в работе [7], в которой предлагается алгоритм повышения разрешения гиперспектрального (HS) изображения, основанный на спектральном несмешивании, для слияния многоспектрального (MS) изображения с высоким пространственным разрешением и изображения HS (HSI) с низким пространственным разрешением.

Известны также работы, посвященные вопросам повышения отдельных свойств снимка: разрешение, экспозиция, резкость и размытие и пр. за счет совмещения снимков с имеющимися в базе данных и вычислении на основе полученного совмещения нового изображения [8].

В отличие от методов, направленных на обработку готового снимка, в работе [9] рассматривается метод, позволяющий пользователю за счет интерактивных подсказок получить более качественный снимок.

Проведенный анализ показал, что существующие решения направлены на увеличение разрешения фотоснимка без потери качества и улучшение изображения, представленного на фотоснимке (повышение детализации и восприятия). Основным недостатком таких решений является вычислительная сложность, что затрудняет работу со снимками в режиме реального времени. Также следует отметить, что подавляющее большинство алгоритмов и подходов к повышению качества фотоснимка основывается на постобработке – работе с уже отснятыми изображениями.

Концепция мобильно-облачного измерительного комплекса

В основе мобильно-облачного измерительного комплекса лежит идея совмещения интеллектуальных средств, современных методов компьютерной обработки изображений и распознавания образов.

Существующие системы характеризуются жесткой привязкой к алгоритмам обработки изображений. Это является следствием их жесткого кодирования в структуру системы. Реалии рынка таковы, что потребителю для использования новых, более продуктивных измерительных алгоритмов приходится приобретать новые программно-аппаратные решения.

Чтобы устранить данный недостаток, авторами разработана концепция мобильно-облачной технологии бесконтактного измерения геометрических параметров объектов.

Предлагаемое решение концептуально имеет многоуровневую архитектуру (рис. 1) и позволяет обеспечить независимость клиентской части от алгоритмов обработки и сделать ее универсальной. Подобные выгоды от разделения функциональности на клиентской и серверной частях известны давно [10].

Данная технология подразумевает одновременное использование следующих устройств и компонентов системы измерения геометрических параметров:

1. Мобильное устройство (планшет или смартфон), на которое устанавливается специализированное приложение. В функции данного приложения входит фотографирование, выполнение базовых настроек и предварительная обработка изображения, которая выполняется в случае ограниченных возможностей канала связи;

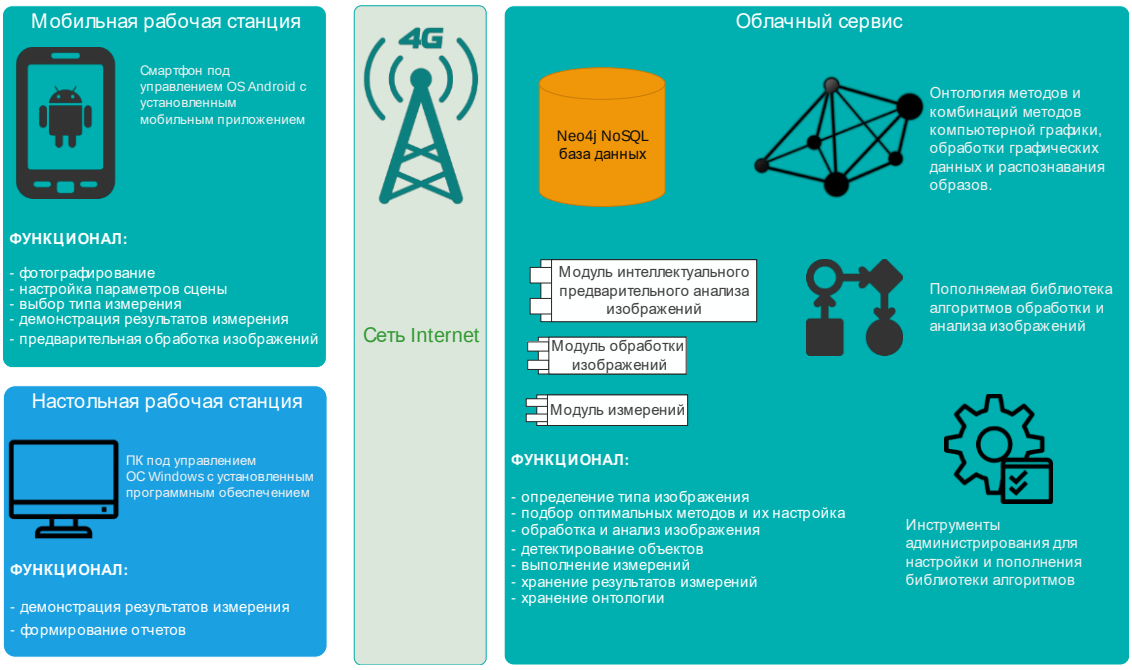


Рисунок 1. – Архитектура мобильно-облачного измерительного комплекса

2. Облачный сервис, предоставляющий интерфейс между мобильным приложением и основными компонентами системы;

3. Интеллектуальный модуль предварительного анализа изображений, выполняющий интеллектуальный подбор подходящего алгоритма исходя из полученных параметров сцены, EXIF-данных о цифровой камере;

4. Модуль обработки изображений, выполняющий анализ и измерения на изображении с применением интеллектуально подобранного алгоритма;

5. Облачную базу данных, которая содержит результаты выполненных измерений и исходные изображения, полученные от клиентов;

6. Онтологию методов и алгоритмов обработки изображений, необходимую для работы интеллектуального модуля предварительного анализа изображений.

Данный комплекс компонентов предоставляет поставщику услуг и потребителю расширенную функциональность, а также обеспечивает возможность эволюционного развития системы.

Подход к получению изображений высокого разрешения

Любое измерительное устройство характеризуется наличием погрешности, которая может быть обусловлена различными факторами. В концепции мобильно-облачного измерительного комплекса мобильное устройство вносит инструментальную погрешность, которая, как показывают проведенные практические исследования, в значительной и практически равной степени зависит как от качества устройства, так и от условий съемки.

Одним из факторов, который ограничивает возможности применения мобильных устройств в качестве средств получения цифровых изображений измеряемых объектов является разрешение снимка. В зависимости от данного параметра устанавливаются пороговые значения физических размеров измеряемого объекта, которые находятся в обратной зависимости от разрешения снимка. Довольно частым явлением можно считать программное увеличение изображения, что свойственно для устройств низкой ценовой категории, снабженных дешевыми матрицами.

Абстрагировавшись от методов и алгоритмов сжатия, форматов представления данных и пр. цифровое изображение I в каноническом виде можно представить как двумерную матрицу размерности m×n, где m и n количество пикселей по горизонтали и вертикали. В ячейках такой матрицы записаны значения, характеризующие пиксель, например, интенсивность цвета в модели RGB:

$$I = \begin{matrix} 255,255,255 & \dots & 222,122,0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0,0,255 & \dots & 0,0,24 \end{matrix}$$

Представим теперь, что в ячейках матрицы W, описывающей цифровое изображение, содержатся не параметры отображения пикселя, а матрицы, описывающие отдельные упорядоченные фрагменты изображения одинакового размера, то есть сформируем матрицу матриц размерности p×q:

$$W = \begin{matrix} 0,0,255 & \dots & 100,100,100 & \cdots & \cdots & \cdots & 222,122,0 & \dots & 222,122,0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0,0,255 & \dots & 123,123,123 & \cdots & \cdots & \cdots & 222,122,0 & \dots & 222,122,0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & \dots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & & \\ 0,0,255 & \dots & 123,123,12 & \cdots & \cdots & \cdots & 0,0,24 & \dots & 123,123,12 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0,0,255 & \dots & 123,123,12 & \cdots & \cdots & \cdots & 123,123,12 & \dots & 222,122,0 \end{matrix}$$

Полученная таким образом матрица будет существенно меньшего размера, поскольку каждая содержащаяся в её ячейках матрица представляет собой полноценное изображение. Так, матрица W размерности 3x3, состоящая из матриц I размерности 1000x1000 представляет собой изображение размером 3000 на 3000 пикселей.

В практическом ключе приведенные выше гипотезы вытекают в то, что за один фотоснимок формируется лишь часть изображения, а полную картину можно получить, сняв p×q фотографий объекта. А именно частей объекта, идущих в таком же порядке, как и значения в ячейках матрицы W. Это можно проиллюстрировать следующей блок-схемой (рис. 2).

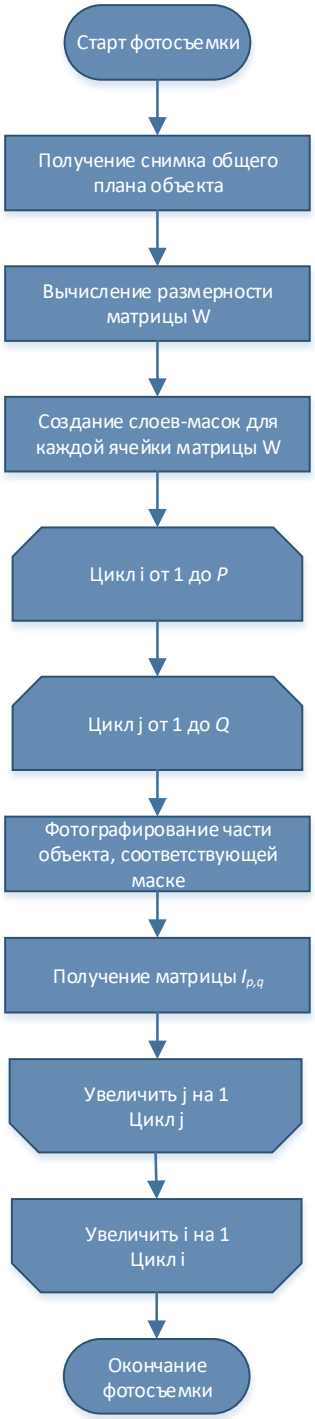


Рис. 2 Блок-схема алгоритма получения снимков высокого разрешения с помощью камеры мобильного телефона

Представленная на рисунке 2 блок-схема соответствует в общих чертах имеющимся алгоритмам получения панорамных и объемных снимков, однако её ключевым отличием является использование в качестве отправной точки – снимка общего плана измеряемого объекта.

Заключение

В статье предложен подход к получению снимков высокого разрешения с помощью камеры мобильного телефона. Основным отличием предложенного подхода от известных

алгоритмов панорамной съемки является использование слоев-масок, получаемых из снимка общего плана измеряемого объекта.

Слои-маски позволяют точнее позиционировать телефон, сохраняя не только крайние точки фотографий частей объекта при их склеивании, но также и пропорции объекта, что позволяет избежать известных искажений, присущих панорамным снимкам.

Предметом дальнейших исследований является разработка алгоритмов вычисления размерности матрицы W, а также выделения слоев-масок из снимка общего плана измеряемого объекта. Отдельным исследованием является оценка производительности и оптимизация предложенного и разрабатываемых в будущем алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлов А.Н. Фотометрический метод формирования и обработки данных, торцов круглых лесоматериалов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2007. № 26. С. 54-73.

2. Samoylov A. The method of constructing the structures of configurable automated system for measuring volume of roundwood// WIT Transactions on Information and Communication Technologies Cep. "Information and Communication Technology for Education" 2014. С. 277-284.

3. Eyal Carmia,T, Siuyan Liub, Noga Alona, Amos Fiata,T, Daniel Fiatc, “Resolution Enhancement In MRI”, Magnetic Resonance Imaging, 2011, 133– 154

4. K Ratna Babu And Dr.K.V.N.Sunitha, “A New Approach To Enhance Images Of Mobile Phones With In-Built Digital Cameras Using Mean And Variance”, International Conference On Advances In Computer Engineering, 2013

5. Ignatov, A., Kobyshev, N., Timofte, R., Vanhoey, K., & Van Gool, L. (2018). WESPE: Weakly supervised photo enhancer for digital cameras. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. https://doi.org/10.1109/CVPRW.2018.00112

6. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Ide1, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima And Takashi Naito; Road Image Update using InVehicle Camera Images And Aerial Image”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (Iv) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011

7. Mohamed Amine Bendoumi, Mingyi He, Shaohui Mei, “Hyper Spectral Image Resolution Enhancement Using High-Resolution Multispectral ImageBased On Spectral Unmixing”, IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing 2011.

8. Zhang, C., Gao, J., Wang, O., Georgel, P., Yang, R., Davis, J., … Pollefeys, M. (2014). Personal photograph enhancement using internet photo collections. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 20(2), 262–275.

9. Xu, Y., Ratcliff, J., Scovell, J., Speiginer, G., & Azuma, R. (2015). Real-time guidance camera interface to enhance photo aesthetic quality. In Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings (Vol. 2015-April, pp. 1183–1186). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/2702123.2702418

10. Buschmann, Frank; Meunier, Regine; Rohnert, Hans; Sommerlad, Peter; Stal, Michael (1996-08). Pattern-Oriented Software Architecture, Volume 1, A System of Patterns. Wiley, August 1996. ISBN 978-0-471-95869-7. Retrieved from http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471958697.html

IV. УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-352-364

Першин Иван Митрофанович (1), Веселов Геннадий Евгеньевич (2), Малков Анатолий Валентинович (1),Першин Максим Иванович (2).

1. Северо-Кавказский федеральный университет
2. Южный федеральный университет

КОРРЕКЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. *Значительный й класс математических моделей объектов с распределенными параметрами не имеет аналитического решения. Для исследования таких объектов используют дискретные математические модели, с помощью которых определяются тенденции развития процессов, синтезируются распределенные системы управления и осуществляется исследование различных режимов. Известно, что характеристики дискретных математических моделей отличаются от реальных процессов. В качестве оценки близости реального процесса и его дискретной модели выбраны динамические характеристики, используемые в процедуре анализа синтеза распределенных регуляторов. Чем ближе динамические характеристики реального процесса и дискретной модели, тем точнее анализ тенденций развития процессов. В работе показана коррекция (верификация) дискретных математических моделей распределенных объектов.*

Ключевые слова*: Распределенные объекты; дискретные математическиемодели; динамические характеристики, верификация.*

Description. *Significant class of mathematical models of objects with distributed parameters has no analytical solution. For the study of such objects, discrete mathematical models are used, with the help of which the trends in the development of processes are determined, distributed control systems are synthesized and various modes are studied. It is known that the characteristics of discrete mathematical models differ from real processes. Dynamic characteristics used in the procedure of analysis of synthesis of distributed controllers are chosen as an estimate of the proximity of the real process and its discrete model. The closer the dynamic characteristics of the real process and the discrete model, the more accurate the analysis of trends in the development of processes. The paper shows the correction (verification) of discrete mathematical models of distributed objects.*

Keywords: *Distributed objects; discrete mathematical models; dynamic characteristics, verification.*

Введение.

Процессы, протекающие в окружающей нас среде, а так же многие технологические процессы неразрывно связаны с пространственными координатами. Математические модели рассматриваемых процессов, как правило, описываются уравнениями в частных производных. Отличительным свойством распределенных систем является наличие пространственных составляющих в сигнале входа и выхода, да и сам исследуемый процесс изменяется не только во времени, но и в пространстве. Системный анализ таких (распределенных) процессов развивается с семидесятых годов прошлого века.

На сегодняшний день сложились следующие направления исследования систем с распределенными параметрами:

– существует аналитическое решение математической модели, которое распадается по собственным вектор-функциям оператора объекта. При этом мы имеем бесконечный спектр таких функций, а каждая вектор-функция описывается трансцендентными функциями (поведение каждой пространственной моды описывается в бесконечном фазовом пространстве). Следует отметить, что теоретические исследования учитывают весь бесконечный спектр, а практическая реализация (например: исполнительных устройств, наблюдателей состояния объекта, синтезированных регуляторов) использует методы дискретизации;

– не существует решения математической модели, в этом случае используются аппроксимационные модели, описывающие реакцию объекта на выбранные пространственные моды. При этом используется либо физически реализованный объект, либо дискретный аналог математической модели с последующим численным решением. При этом, теоретические исследования строятся на базе аппроксимационных моделей. Один из наиболее известных аппроксимационных методов решения практической задачи показан в работах

ЛадиковаЮ.П. , Самойленко Ю.И. [1], управляя электромагнитным полем в системах токомак (физически намотав соответствующие обмотки),реализовали воздействие по 3-м пространственным модам.

Хорошо известны научные школы, которые, по сути, разработали понятийный аппарат, и каждая школа сформировала свой путь исследования таких систем:

1. Школа, возглавляемая А.Г. Бутковским (Москва, ИПУ) - разработана структурная теория систем с распределенными параметрами. Отдельное направление рассматриваемой школы (совместно с Л.М. Пустыльников) разработка теории подвижного управления[2-6];

2. Школа, возглавляемая Т.К. Сиразетдиновым (Казань, КАИ) -разработана теория оптимального управления систем с распределенными параметрами, а совместно с Г. Л. Дектяревым разработано направление «Оптимальное управление процессами с распределенными параметрами при неполном измерении»[7,8];

3. Школа, возглавляемая Э. Я. Рапопортом (Самара, СамГТУ) разработан альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации, методы оптимального управления различными технологическими процессами, методика решения обратных задач в распределенных системах[9-11];

4. Школа, возглавляемая В.А. Ковалем (Саратов, СПИ) – разработана методика применения метода АКОР для СРП [12-13];

5. Школа, разрабатывающая частотную концепцию анализа и синтеза систем с распределенными параметрами (СКФУ). Известная частотная концепция анализа и синтеза сосредоточенных систем [14]перенесена на выделенный класс систем с распределенными параметрами [15-18].

Основные особенности распределенных систем рассмотрим на простом примере: положим, что имеется пластина конечных размеров, в которой осуществляется процесс распространения тепла. Математическая модель объекта описывается уравнением:

$$\frac{\partial T(\mathrm{x,y,z},\tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T(\mathrm{x,y,z},\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(\mathrm{x,y,z},\tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(\mathrm{x,y,z},\tau)}{\partial z^2} \right), \qquad (1)$$

$$0 < \mathrm{x} < \mathrm{X_L}, 0 < \mathrm{y} < \mathrm{Y_L}, 0 < \mathrm{z} < \mathrm{Z_L},$$

где $T(x, y, z, \tau)$ - фазовая переменная; x, y, z, - пространственные координаты; a – заданный коэффициент; X_L, Y_L, Z_L – заданные числа.

С помощью уравнения (1) описываются различные физические процессы (если $\boldsymbol{a}$– коэффициент диффузии то приведенное уравнение описывает диффузионный процесс, если $\boldsymbol{a}$– коэффициент температуропроводности то процесс распространения тепла, если $\boldsymbol{a}$ – пьезопроводность то гидролитосферный процесс) при этом формируются и соответствующие граничные условия.

Граничные и начальные условия для уравнения (1) зададим в виде:

$$T(0,y,z,\tau)=T(x,0,z,\tau)=T(x_L,y,z,\tau)=T(x,y_L,z,\tau)=0$$
$$\frac{\partial T(x,y,0,\tau)}{\partial z}=0,\ \lambda\cdot\partial T(x,y,z_L,\tau)/\partial z=U(x,y,\tau),\ T(x,y,z,0)=0.$$

Функция выхода – значение температурного поля T(x,y,z*,τ)
(z*– заданное число(0<z*<Z_L)).

Разложим входное воздействие $U(x,y,\tau)$ в ряд Фурье, с учетом граничных условий:

$$U(x,y,\tau)=\sum_{\eta,\gamma=1}^{\infty}C_{\eta,\gamma}(\tau)\cdot\sin(\psi_\eta\cdot x)\cdot\sin(\tilde{\phi}_\gamma\cdot y),\ \text{где}\ \psi_\eta=\pi\cdot\eta/X_L;\ \tilde{\phi}_\gamma=\pi\cdot\gamma/Y_L. \quad (2)$$

и найдем реакцию объекта, при z=z*,на каждую составляющую ряда (2)[15,16]:

$$\bar{T}_{\eta,\gamma}(x,y,z^*,s)=\frac{\exp(\beta_{\eta,\gamma}\cdot z^*)+\exp(-\beta_{\eta,\gamma}\cdot z^*)}{\exp(\beta_{\eta,\gamma}\cdot Z_L)+\exp(-\beta_{\eta,\gamma}\cdot Z_L)}\cdot\bar{C}_{\eta,\gamma}(s)\cdot\sin(\psi_\eta\cdot x)\cdot\sin(\tilde{\varphi}_\gamma\cdot y) \quad (3)$$

где $\bar{T}_{\eta,\gamma}(x,y,z^*,s)$ и $\bar{C}_{\eta,\gamma}(s)$ – преобразованные по Лапласу функции $T_{\eta,\gamma}(x,y,z^*,\tau)$ и $C_{\eta,\gamma}(\tau)$, $\beta_{\eta,\gamma}=\left(\frac{s}{a}+\psi_\eta^2+\tilde{\phi}_\gamma^2\right)^{1/2}$, $(\eta,\gamma=\overline{1,\infty})$.

Передаточная функция объекта по η,γ $(\eta,\gamma=\overline{1,\infty})$ моде входного воздействия имеет вид [15]:

$$W_{0,\eta,\gamma}(s)=\frac{\exp(\beta_{\eta,\gamma}\cdot z^*)+\exp(-\beta_{\eta,\gamma}\cdot z^*)}{\lambda\cdot\beta_{\eta,\gamma}\cdot(\exp(\beta_{\eta,\gamma}\cdot Z_L)-\exp(-\beta_{\eta,\gamma}\cdot Z_L))},(\eta,\gamma=\overline{1,\infty}) \quad (4)$$

Таким образом, рассматриваемый распределенный объект может быть представлен в виде совокупности передаточных функций $W_{0,\eta,\gamma}(s)$ $(\eta,\gamma=\overline{1,\infty})$, при этом каждая передаточная функция может быть представлена отношением бесконечных полиномов [16,17]. Рассмотрим характер изменения функции

Обозначим $\beta_{\eta,\gamma}=\left(\frac{s}{a}+\psi_\eta^2+\tilde{\phi}_\gamma^2\right)^{1/2}$.

$$G_{\eta,\gamma}=\psi_\eta^2+\tilde{\varphi}_\gamma^2,(\eta,\gamma=\overline{1,\infty})$$

Дискретная функция $G_H=G_{1,1}\le G_{\eta,\gamma}\le\infty$. Переходя от дискретной функции$G_{\eta,\gamma}$к непрерывнойG (названной обобщенной координатой) охватывающей весь спектр дискретных значений функции $G_{\eta,\gamma}$, в [15,16] приведен пространственный годограф (см. рис.1), описывающий динамику рассматриваемого распределенного объекта(всего спектра передаточных функций (4)).

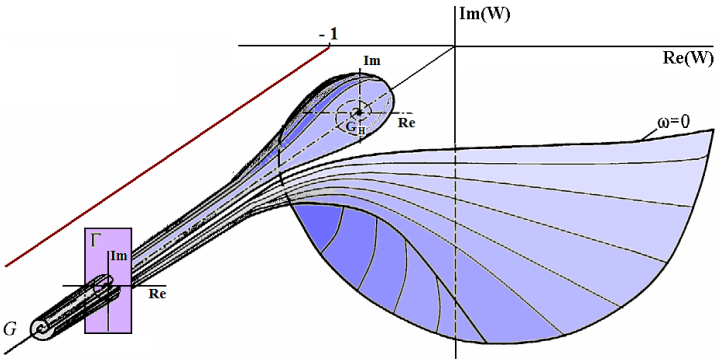


Рис.1. Пространственный годограф

В [19] приведены условия, которым должна удовлетворять передаточная функция разомкнутой системы (представленная в виде отношения аналитически целых функций) при

выполнении которых возможно применение критерия Найквиста для оценки устойчивости замкнутой системы. Эти условия заключаются в следующем: внутри контура интегрирования (правая полуплоскость s) передаточная функция (Φ_p) должна быть мероморфной;

$\lim_{s\to\infty} \Phi_p(s) = const$ Собдюдение этих условий для передаточных функций показано в [16,17].

Решение любой технической задачи предполагает, что имеется конечное число исполнительных элементов (реализующих входное воздействие) и конечное число датчиков, с помощью которых восстанавливается функция выхода. Рассмотрим, что происходит при усечении распределенных систем (при выборе конечного числа пространственных мод, передаточные функции которых описываются конечными полиномами). Решение задачи управления может строиться с использованием схем, приведенных на рис.2, рис.3, рис.4.

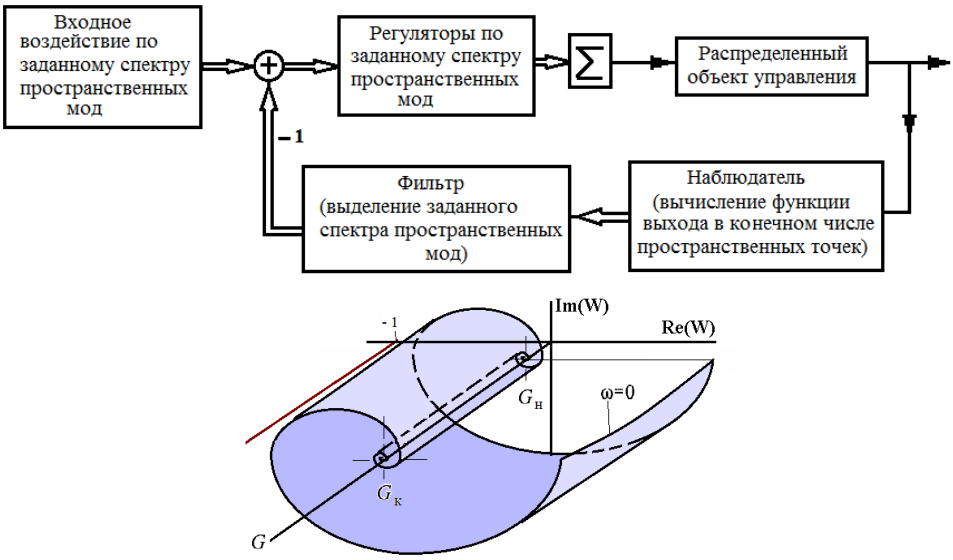
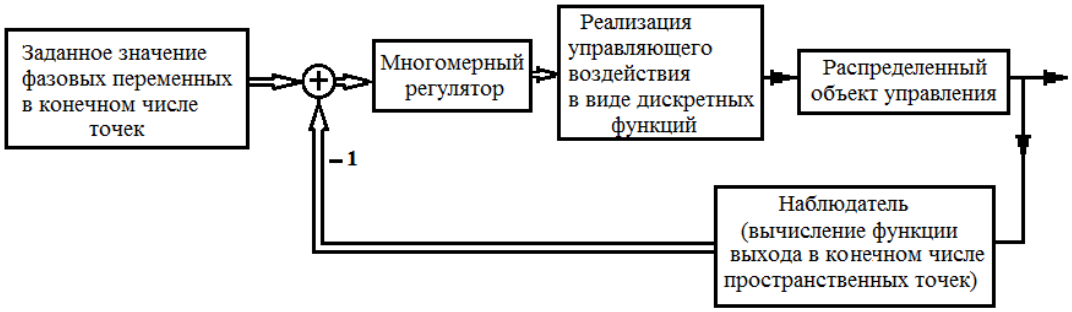


Рис.2. Первая схема решения задач управления

Пространственные моды, не принадлежащие выделенному спектру, не присутствуют в контуре управления (см. рис.2).

Реализация управляющего воздействия в виде дискретных функций (например, в тепловых процессах с помощью секционных нагревателей) порождает присутствие в системе управления пространственных мод, не принадлежащих выделенному спектру (см. рис.3). В этом случае, распределенный регулятор воздействует на выделенное число пространственных мод ($G_н \le G_{\eta,\gamma} \le G_к$).



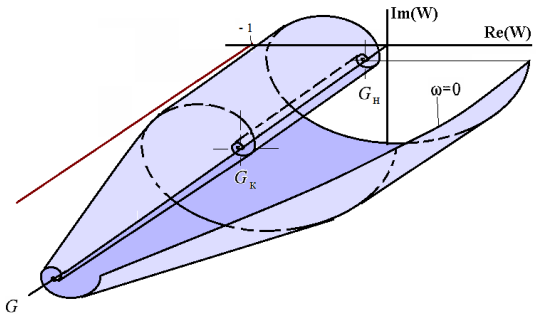


Рис 3. Вторая схема решения задач управления

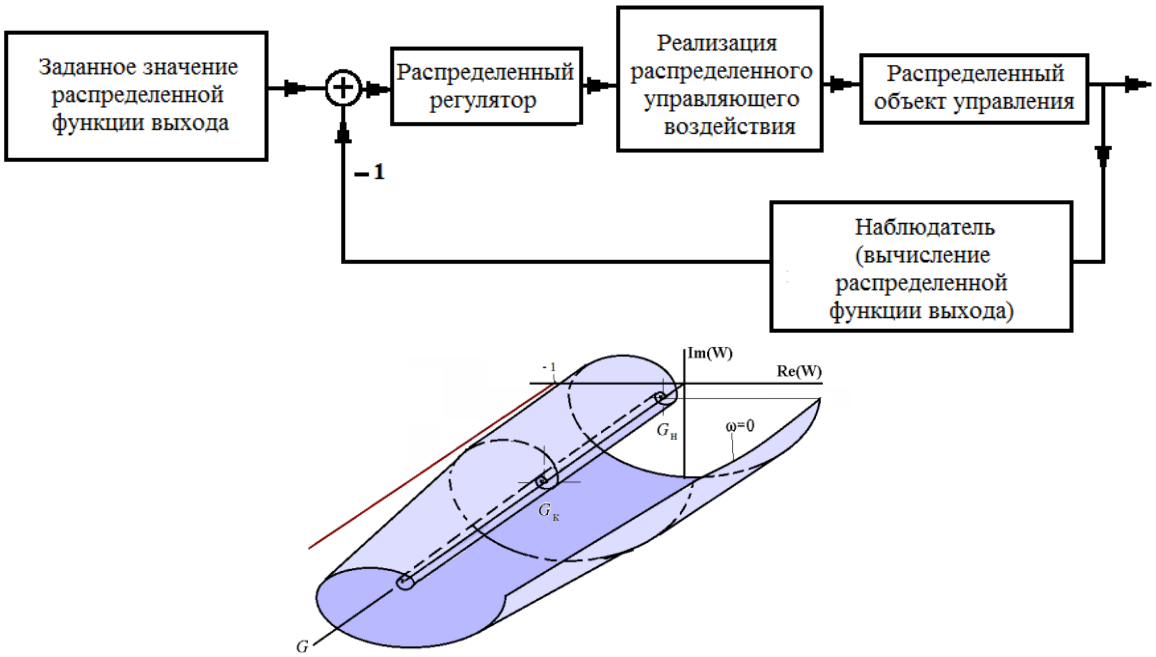


Рис. 4. Третья «идеальная» схема решения задач управления

В «идеальном» варианте (см. рис.4), вся бесконечная совокупность пространственных мод присутствует в системе управления. В [16-18] исследовано поведение пространственного годографа разомкнутой системы управления тепловыми процессами при различных вариантах распределенных регуляторов. Показано, что пространственный годограф разомкнутой системы будет «сжиматься» при G → ∞, а передаточная функция (4), с учетом обобщенной координаты, аппроксимируется звеном [16]:

$$W_a(\mathrm{G},s)=\frac{1}{\lambda\cdot\beta(G,s)}\cdot\exp\left(-\beta(G,s)\cdot\Delta z\right),\beta_{\eta,\gamma}=\left(\frac{s}{a}+G\right)^{1/2} \qquad (5)$$

При этом получено[20-22], что динамические характеристики точного решения (4) и аппроксимирующего звена (5) отличаются не существенно.

В [23-29] показана методика синтеза распределенных регуляторов, воздействующих на весь спектр пространственных мод. Структура рассмотренных регуляторов формируется из специального набора распределенных звеньев [15-18]. Распределенный регулятор, реализующий пропорционально – интегрально – дифференциальный закон управления имеет вид:

$$W\left(x,y,s\right)=E_1\cdot\left[\frac{n_1-1}{n_1}-\frac{1}{n_1}\nabla^2\right]+E_4\cdot\left[\frac{n_4-1}{n_4}-\frac{1}{n_4}\nabla^2\right]\cdot\frac{1}{s}+E_2\cdot\left[\frac{n_2-1}{n_2}-\frac{1}{n_2}\nabla^2\right]\cdot s,$$

где: E_i– заданные числа, n_i – весовые коэффициенты ($n_i\geq1$),(i=1,2,4),

x, y – пространственные координаты; ∇^2 - лапласиан; s -оператор Лапласа;

Передаточная функция распределенного регулятора, записанная с использованием обобщенной координаты, может быть представлена в виде следующего соотношения:

$$W(G,s) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G \right] \cdot \frac{1}{s} + E_2 \cdot \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{1}{n_2} G \right] \cdot s$$

$$G_H \le G \le \infty.$$

Поскольку входное воздействие и функция выхода реализуются в конечном числе точек пространственной области $\{x,y\}$, при реализации распределенных регуляторов используют аппроксимационные методы [15-18].

Выше показано, что каждая пространственная мода описывается в бесконечном фазовом пространстве (собственное движение описывается дифференциальным уравнением бесконечного порядка). Существуют различные методы аппроксимации таких уравнений, дифференциальными уравнениями конечного порядка. В [30] приводится процедура выбора порядка аппроксимационного полинома, исходя из заданной точности определения минимального по модулю корня.

Коррекция дискретных математических моделей распределенных объектов. Сравним динамические характеристики аппроксимирующего звена (4) и аналогичного звена, параметры которого определяются с использованием численной модели объекта управления. Рассмотрим сравнение характеристик на примере исследования динамических характеристик объекта, математическая модель которого приведена выше. Будем полагать, что значения соответствующих параметров, в системе «СИ», равны:

$$a=0.0015,\ Z_L=0.16\ ,\ z^*=0.1,\ X_L=0.8,\ Y_L=0.5,\ \lambda=0.23\ ,$$

$$G_H = \psi^2_{\eta=1} + \tilde{\varphi}^2_{\gamma=1} = (\pi \cdot 1/0.8)^2 + (\pi \cdot 1/0.5)^2$$

Звено (5), в соответствии с исходными данными, записывается в виде

$$W_a(G,s) = \frac{1}{0.23 \cdot \beta(G,s)} \cdot \exp\left(-\beta(G,s) \cdot 0.06\right), \beta = \left(\frac{s}{0.0015} + G \right)^{1/2} \qquad (6)$$

$$(G_H \le G \le \infty).$$

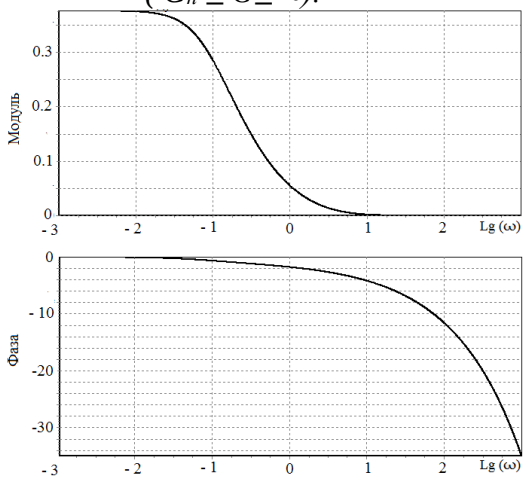


Рис. 5. Частотные характеристики по первой пространственной моде

На рис.5 показаны амплитудная и фазовая частотные характеристики рассматриваемого объекта по первой пространственной моде ($G=G_H$).

Сдвиг по фазе рассматриваемого звена, при $\omega=0.1$ составляет $f_{0.1}=-0.67822$, при этом сдвиг по времени функции выхода от входного воздействия ($\Delta\ \tau$) составляет - 6.7821с. Представляя уравнение (1) и граничные условия в дискретном виде, был разработан алгоритм численного моделирования объекта (схема дискретизации приведена на рис. 6.). При

моделировании, число точек дискретизации и по соответствующим координатам выбрано равным:

$N_x=16,(\eta=1...N_x);\ N_y=16,\ (\gamma=1...N_y);\ N_z=17,(\xi=1...N_z)$.

Шаги дискретизации определялись из следующих соотношений:

$\Delta x=X_L/(N_x-1),\ \Delta y=Y_L/(N_y-1),\ \Delta z=Z_L/(N_z-1).$

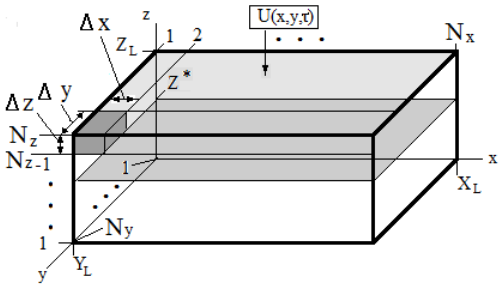


Рис.6. Схема дискретизации

Была определена реакция объекта на первую пространственную моду (см.(2)).

Поскольку объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных [16], то реакция объекта по первой пространственной моде определялась на:

статическое входное воздействие

$$U_{\eta,\gamma}(\tau)=10\cdot\sin(\psi_1\cdot(\eta-1)\cdot\Delta x)\cdot\sin(\tilde{\varphi}_1\cdot(\gamma-1)\cdot\Delta y),\eta=\overline{1,N_x},\gamma=\overline{1,N_y}$$

и динамическое входное воздействие

$$U_{\eta,\gamma}(\tau)=10\cdot\sin(\psi_1\cdot(\eta-1)\cdot\Delta x)\cdot\sin(\tilde{\varphi}_1\cdot(\gamma-1)\cdot\Delta y)\cdot\sin(0.1\cdot\tau),\eta=\overline{1,N_x},\gamma=\overline{1,N_y}.$$

По результатам вычислений построены графики функций в выбранных точках дискретизации, приведенные на рис.7 и рис.8. Определим статический коэффициент усиления по первой пространственной моде:

$K=T_{8,8,11}(\tau\to\infty)/U_{8,8}(\tau\to\infty)=5.41029/9,889=0.54708.$

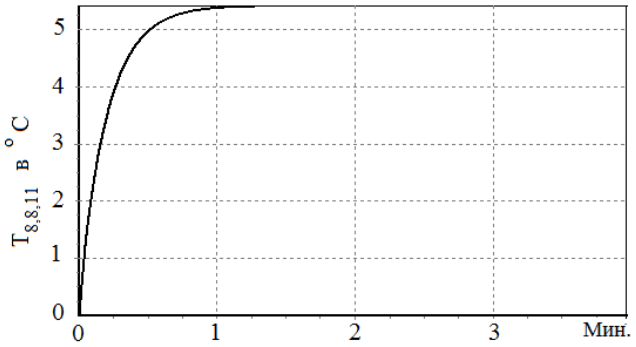


Рис.7.График переходного процесса

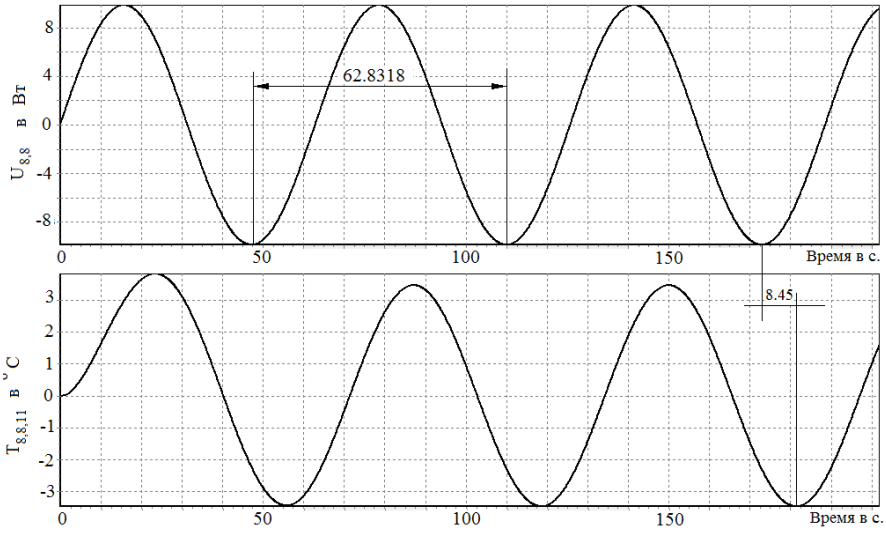


Рис. 8. Реакция объекта на динамическое входное воздействие

Сдвиг во времени составляет 8.45с. Определим сдвиг по фазе функции выхода относительно входного воздействия $\Delta\varphi = -2\cdot\pi\cdot 8.45/62.8318 = -0.845$.

Поскольку параметр z^* в рассматриваемой задаче задан и равен 0.06, то скорректируем методику вычисления параметров аппроксимирующего звена [20-22] для решения поставленной задачи. Полагая s=jω, запишем (5) в виде:

$$W_a(\mathrm{G},\mathrm{j}\omega) = \frac{K}{\beta(G,\mathrm{j}\omega)}\cdot\exp\left(-\beta(G,\mathrm{j}\omega)\cdot\Delta z^*\right), \beta = \left(\frac{\mathrm{j}\omega}{a}+G\right)^{1/2}, \Delta z^* = Z_L - z^* \qquad (7)$$

Полагая G= G_H , ω=0 и приравнивая (7) вычисленному выше статическому коэффициенту усиления по первой пространственной моде, получим

$$0.54708 = \frac{K}{\beta(G_H)}\cdot\exp\left(-\beta(G_H)\cdot 0.06\right), \beta = \left(G_H\right)^{1/2} \qquad (8)$$

Решая уравнение (8) получим K=6.322782.

Определим значение параметра **a**. Для этого воспользуемся вычисленным значением сдвиг по фазе функции выхода относительно входного воздействия $\Delta\varphi = -0.845$ (см. рис.8). Комплексный передаточный коэффициент аппроксимирующего звена по первой пространственной моде записывается в виде

$$W_a(\mathrm{G_H},\mathrm{j}\omega) = \frac{6.322782}{\beta(G_H,\mathrm{j}\omega)}\cdot\exp\left(-\beta(G_H,\mathrm{j}\omega)\cdot 0.06\right), \beta = \left(\frac{\mathrm{j}\omega}{a}+G_H\right)^{1/2} \qquad (9)$$

Полагая s=jω (ω=0.1), $\Delta\varphi = -0.845$ запишем соотношение для определения фазы аппроксимирующей функции (9)

$$-0.845 = -0.06\cdot\mathrm{Im}(\beta) - \arctan(\mathrm{Im}(\beta)/\mathrm{Re}(\beta)) \qquad (10)$$

Используя соотношение(9) определим значение параметра **a (**a=0.001035**)**.

Звено, аппроксимирующее динамические характеристики дискретной модели объекта управления, записывается в виде

$$W_a(\mathrm{G},s) = \frac{6.322782}{\beta(G,s)}\cdot\exp\left(-\beta(G,s)\cdot 0.06\right), \beta_{\eta,\gamma} = \left(\frac{s}{0.001035}+G\right)^{1/2}, \qquad (11)$$

$$(G_н \le G \le \infty).$$

На рис.9 приведены графики рассогласования модулей (модуль объекта (6) – модуль объекта(11)) и фазы (фаза объекта (6)- фаза объекта (11)).

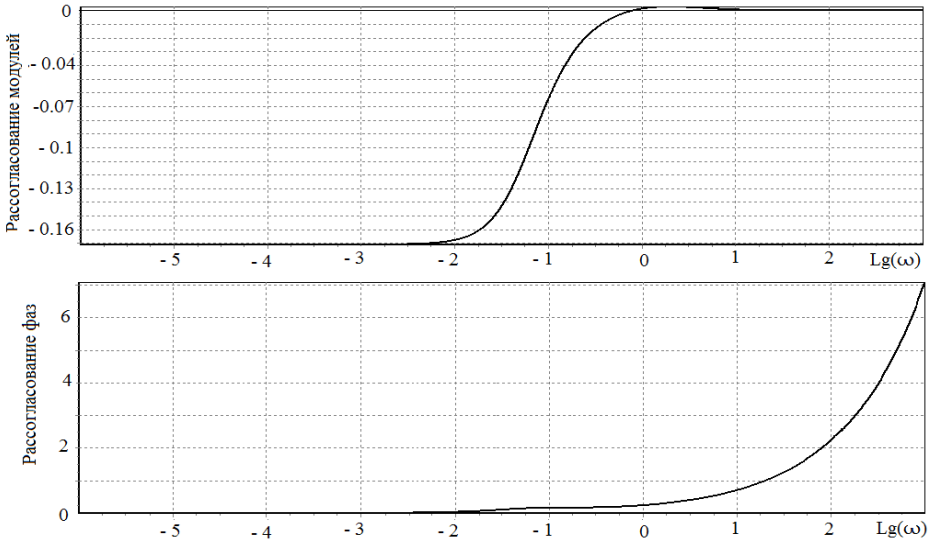


Рис. 9. Рассогласование амплитудной и фазовой частотных характеристик

Сравнительные результаты (6) и (11), с учетом (5) приведены в табл.1

Табл.1Сравнительные результаты

Для точного решения	Для дискретной модели
λ=0.23	$\lambda_д$=1/6.322782=0.15816
a=0.0015	a=0.001035

Верификация дискретной модели. Под верификацией дискретной модели будем полагать достижение близости динамических характеристик объекта (6) и динамических характеристики дискретной модели объекта (11).

Процедура верификации распадается на следующие этапы:

1. Используя дискретную модель объекта, и изменяя значение коэффициента теплопроводности, были вычислены значения статического коэффициента усиления (К) по первой пространственной моде входного воздействия (см. (7),(8)), а так же рассогласование Δ= К- 1/λ. По результатам вычислений построен график приведенный на рис. 10. Вычисленное значение параметра λ для дискретной модели $\lambda_д$=0.3375 , обеспечивающее заданный коэффициент усиления дискретной модели ($К_д$= 1/ λ).

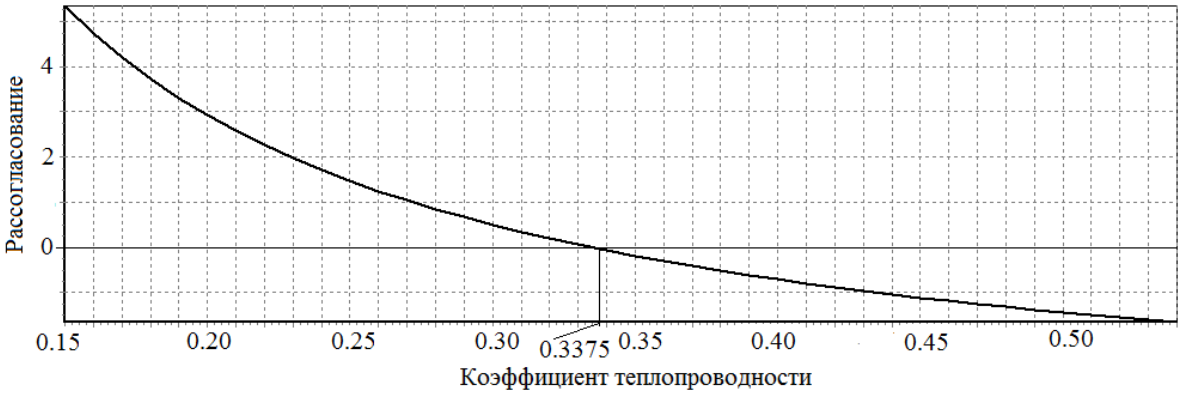


Рис.10. Определение параметра λ для дискретной модели объекта

2. Аналогичным образом определим изменение сдвига фазы у функции выхода относительно входного воздействия. Подадим на вход дискретной модели объекта гармоническое входное воздействии по первой пространственной моде (

$U(x,y,\tau)=10\cdot\sin(\psi_1\cdot x)\cdot\sin(\tilde{\varphi}_1\cdot y)\cdot\sin(0.1\cdot\tau)$. Изменяя значение параметра ***a***, был вычислен сдвиг по времени сигналов входа и выхода для дискретной модели объекта ($\Delta_{дм}$) и определена функция рассогласования $\Delta_р = \Delta_{дм} - \Delta_\tau =$

$\Delta_{дм}$ - 6.7821. По результатам расчетов построен график, приведенный на рис.11.

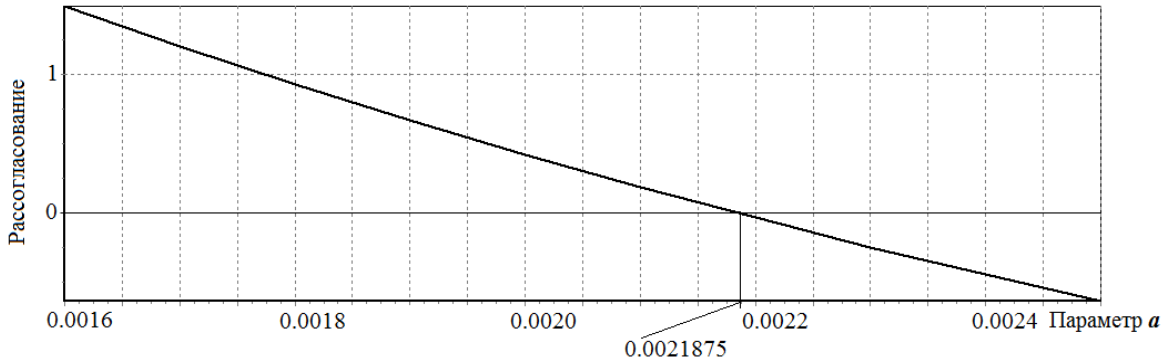


Рис.11. Определение параметра ***a*** для дискретной модели объекта

Вычисленный параметр для дискретной модели ***a***=0.0021875 .

Используя дискретную модель объекта ($\lambda=\lambda_д$=0.3375, ***a***=0.0021875) получены графики переходного процесса (см. рис. 12, рис.13).

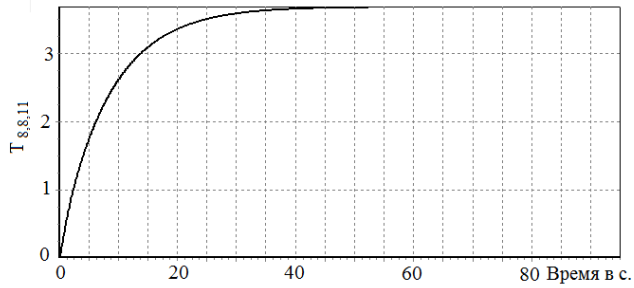


Рис.12. График переходного процесса

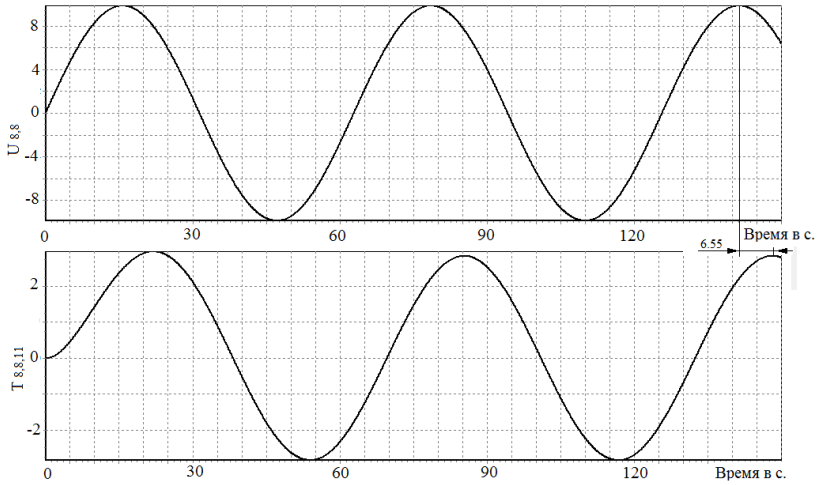


Рис.13. Определение параметров аппроксимирующего звена

Аналогично, как и в предыдущем случае были определены К=0.3729 ,

$\Delta\varphi$=- 2·π· 6.55/62.83185= - 0.655 и параметры звена, аппроксимирующего динамические характеристики скорректированной дискретной модели объекта. Передаточная функция аппроксимирующего звена записывается в виде:

$$W_a(G,s)=\frac{4.309727}{\beta(G,s)}\cdot\exp\left(-\beta(G,s)\cdot 0.06\right),\ \beta_{\eta,\gamma}=\left(\frac{s}{0.001584}+G\right)^{1/2},\ G_H\le G\le\infty. \quad (12)$$

На рис.14приведены графики рассогласования модулей (модуль объекта (6) минус модуль скорректированной модели (12)) и фазы (фаза объекта (6) минус фаза скорректированной модели (12)).

Сравнивая рассогласования амплитудной и фазовой частотных характеристик рис.8 и рис.12 убеждаемся в эффективности коррекции параметров дискретной математической модели объекта. По сути, рассогласование амплитудной и фазовой частотных характеристик скорректированной численной модели уменьшилось более чем на порядок.

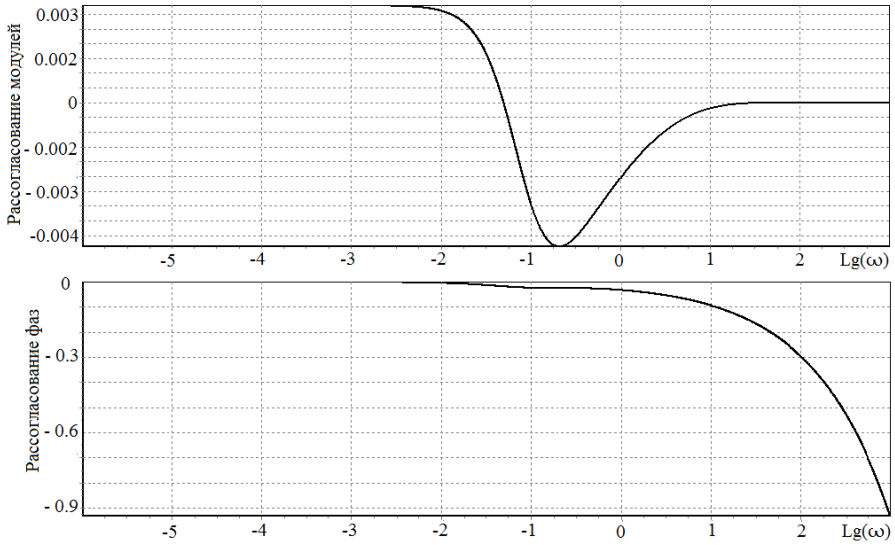


Рис. 14. Рассогласование амплитудной и фазовой частотных характеристик

Заключение.

Известно, что большой класс математических моделей объектов с распределенными параметрами не имеет аналитического решения. Для исследования таких объектов используют дискретные математические модели, с помощью которых определяются тенденции развития процессов, синтезируются системы управления и осуществляется исследование различных режимов. Насколько точно дискретная математическая модель описывает реальный процесс, зависит и эффективность проведенных исследований. В рассматриваемой статье, в качестве оценки близости реального процесса и его дискретной модели выбраны динамические характеристики. Показана эффективность применения коррекции параметров дискретной модели для уменьшения рассогласования модулей и фаз изучаемых процессов и их дискретных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЛадиковЮ.П., Самойленко Ю.И. Применение ортогонализованных обмоток с автоматическими регулируемыми токами для стабилизации плазмы в системах токомак // Техническая физика., 1972. - Т. 42. Вып. 10. - С. 312-346.

2. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. — М.: Наука, 1977. - 320 с.

3. Бугковский А.Г. Управление системами с распределенными параметрами (обзор) // Автоматика и телемеханика. — 1979. — № 11. - с. 16-85.

4. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. — М.: Наука, 1979. — 224 с.

5. Бутковский А.Г., Дарнинский Ю.В., Пустыльников Л.М. Управление распределенными системами путем перемещения источника. — Автоматика и телемеханика. — 1974. — № 5. — С. 11-30.

6. Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1980. - 383 с.

7. Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. - М.: Наука, 1977. - 479 с.

8. Дегтярев Г.Л. К задаче оптимальной фильтрации линейных систем с распределенными параметрами // Оптимизация процессов в авиационной технике: Межвуз. сб. - Казань, 1976. Вып. 1. - С. 6-9.

9. Рапопорт, Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации // – М.: Наука, 2000.

10. Рапопорт, Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами // – М.: Высшая школа, 2005.

11. Рапопорт, Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами // – М.: Высшая школа, 2009.

12. Коваль, В.А. Спектральный метод анализа и синтеза распределенных систем .– Саратов: СГТУ, 2010.

13. КовальВ.А., Торгашова О.Ю. Синтез дискретных регуляторов пониженной размерности для распределенной следящей системы / АиТ. – 2011. – № 10. – С. 72-85.

14. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. I Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Под ред. В.В. Солодовникова. — М.: машиностроение, 1967. — 768 с.

15. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами: проблемы и перспективы.// Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С.2-10.

16. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Из-во РИА КМВ. 2007. 243с

17. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. -М.: Научный мир,2012.-476с.

18. Малков А.В., Першин И.М..Помеляйко И.С., Першин М.И.,Уткин В.А.,Королев Б.И., Дубогрей В.Ф., Хмель В.В. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод. *Системный анализ, диагностика, прогноз и управление.*Москва, Наука 2015.283с.

19. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Особые линейные и нелинейные системы. — М.: Энергия, 1981, 303 с.

20. Першин М.И., Исследование погрешностей динамических характеристик распределенных объектов при аппроксимации.// Современная наука и инновации . Научный журнал. Выпуск №4(8),2014. С. 46-50.

21. Першин М.И., Веселов Г.Е., Першин И.М. Методы аппроксимации

22. передаточных функций распределенных объектов.//СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА. Сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции (5–9 октября 2015 г., Россия, г. Таганрог). Издательство ЮФУ . ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44. С.106-117.

23. Першин М.И., Веселов Г.Е., Першин И.М. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов. //Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015, № 7 (168). С. 126-138

24. Першин И.М. ,Первухин Д.А., Ильюшин Ю.В., Афанасьева О.В. Проектирование распределенных систем управления гидролитосферными процессами. Синтез распределенных систем управления. Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики:IPDME-2017.Сб. трудов международной научно-практической конференции. РИЦ Санкт-Петербургского горного университета. С. 189-195.

25. Першин И.М., Малков А.В. ,М.И. Першин. Математические модели

26. Гидролитосферных процессов. Недропользование XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал № 3 2018. С.56-65.

27. Pershin I.M., Pervukhin D A, Ilyushin Y V ,O V Afanaseva. Design of distributed systems of hydrolithospere processes management. Selection of optimal number of extracting wells. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032030 d o i :10.1088/1755-1315/87/3/032030. p.p.1-6.

28. Малков А.В., Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Автоматизация технологических процессов добычи гидроминерального сырья. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2018, № 5 (199). С.198-210

29. Першин М.И. Проектирование системы управления параметрами Кисловодского месторождения минеральных вод.// 2-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых СКФУ "Университетская наука - региону"Т.1 2014. С.143-156.

30. Першин М.И., Веселов Г.Е. Методы построения систем управления

31. Гидролитосферными процессами.//Современная наука и инновации. Научный журнал. Выпуск №3(19),2017. С. 35-45.

32. Першин М.И. Особенности распределенных объектов.//Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Университетская наука

33. - региону» (3-21 апреля). – Пятигорск: Изд-во ПФ СКФУ, 2017. – Т1. С. 138-143.

34. Валеев К.Г., Жаутыков О.А. Бесконечные системы дифференциальных уравнений. — Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1974.- 415с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-365-375

Коваль Владимир Александрович, Торгашова Ольга Юрьевна, Соломин Максим Андреевич.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ

Аннотация. *В статье рассматривается решение задачи стабилизации температуры в теплообменном аппарате. Предлагается использовать спектральный метод для анализа нестационарного процесса теплообмена в противоточном теплообменном аппарате с учётом температуропроводности стенки. Используя результаты анализа, синтезирован регулятор для стабилизации температуры нагреваемой среды в противоточном теплообменном аппарате. Управление происходит за счёт изменения скорости греющей среды.*

Ключевые слова: *распределенная система, спектральный метод, нестационарный процесс теплообмена.*

Abstract. *The article is devoted the stabilization problem solution of the temperature in the heat exchanger. It is proposed to use a spectral analysis technique for unsteady state heat transfer process in a countercurrent heat exchange unit taking into account the thermal wall. Using the results of the analysis, we to synthesized a regulator to stabilize the temperature of the heated medium in a counter-current heat exchanger. The control is carried out by changing the speed of the heating circuit.*

Keywords: *distributed system, spectral method, the unsteady process of heat-exchange.*

Введение.

Теплообменное оборудование составляет значительную долю реакторных установок и АЭС. Теплообменный аппарат должен обеспечивать барьер, предотвращающий радиоактивное загрязнение технологического продукта или теплоносителя. При этом снижение температурного потенциала при передачи тепла от греющего теплоносителя к нагреваемому должно быть минимальным. Поэтому задача стабилизации температуры теплообменных аппаратов является весьма актуальной, так как от результатов решения зависят энергетические затраты.

Проведение полномасштабных экспериментальных исследований стационарных и, тем более, нестационарных режимов работы теплообменников не всегда бывает возможным. Поэтому полное определение рабочих характеристик теплообменных аппаратов и установок достаточно трудоемко, и для определения всех рабочих режимов используется математическое моделирование[1], [4], [5].

Наибольшее влияние на ход нестационарного процесса теплообмена имеют теплоемкие части теплообменного оборудования. Зачастую, при расчёте и проектировании теплообменных аппаратов такие вторичные факторы, как теплопроводность стенки обычно не учитывают, однако влияние данного фактора в некоторых случаях весьма значительно [6]. Это ведёт к потери «тепла» для установки, а значит и дополнительные потери энергии. Классический расчёт теплообменного аппарата не подразумевает учёта вторичных эффектов, что связанно с трудоёмкостью решения сложных дифференциальных уравнений

Цель работы.

Используя спектральный метод, дать анализ нестационарных теплообменных процессов распространения тепла в теплообменном аппарате. Используя полученную модель, синтезировать регулятор для стабилизации температуры нагреваемой среды.

Математическая модель объекта управления.

Рассмотрим следующую задачу по процессу теплообмена в теплообменном аппарате типа «труба в трубе».

Температура греющей и нагреваемой сред на входе в теплообменный аппарат: $\overline{T}_{1BX}(0,\overline{t}) = \overline{F}_1(\overline{t})$, $\overline{T}_{3BX}(l,\overline{t}) = \overline{F}_3(\overline{t})$.

Система уравнений, описывающая процесс теплообмена в противоточном теплообменном аппарате типа «труба в трубе» может быть представлена в виде:

$$\frac{\partial \overline{T}_1(\overline{x},\overline{t})}{\partial \overline{t}} = -\overline{V}_1(\overline{t})\frac{\partial \overline{T}_1(\overline{x},\overline{t})}{\partial \overline{x}} + \overline{K}_1\left[\overline{T}_2(\overline{x},\overline{t}) - \overline{T}_1(\overline{x},\overline{t})\right], \quad (1)$$

$$\overline{t} \in (0,\infty),\ \overline{x} \in (0,\infty);$$

$$\frac{\partial \overline{T}_2(\overline{x},\overline{t})}{\partial \overline{t}} = \overline{K}_2\left[\overline{T}_1(\overline{x},\overline{t}) - \overline{T}_2(\overline{x},\overline{t})\right] + \overline{K}_3\left[\overline{T}_3(\overline{x},\overline{t}) - \overline{T}_2(\overline{x},\overline{t})\right] + \overline{a}\frac{\partial^2 \overline{T}_2(\overline{x},\overline{t})}{\partial \overline{x}^2}, \quad (2)$$

$$\overline{t} \in (0,\infty),\ \overline{x} \in (0,\infty);$$

$$\frac{\partial \overline{T}_3(\overline{x},\overline{t})}{\partial \overline{t}} = \mp\overline{V}_3(\overline{t})\frac{\partial \overline{T}_3(\overline{x},\overline{t})}{\partial \overline{x}} + \overline{K}_4\left[\overline{T}_2(\overline{x},\overline{t}) - \overline{T}_3(\overline{x},\overline{t})\right], \quad (3)$$

где $\overline{t} \in (0,\infty)$, $\overline{x} \in (0,\infty)$,

$$\overline{K}_1 = \frac{\overline{\alpha}_1\overline{P}}{\overline{S}_1\overline{C}_1\overline{\rho}_1};\ \overline{K}_2 = \frac{\overline{\alpha}_1\overline{P}}{\overline{S}_2\overline{C}_2\overline{\rho}_2};\ \overline{K}_3 = \frac{\overline{\alpha}_3\overline{P}}{\overline{S}_2\overline{C}_2\overline{\rho}_2};\ \overline{K}_4 = \frac{\overline{\alpha}_3\overline{P}}{\overline{S}_3\overline{C}_3\overline{\rho}_3}. \quad (4)$$

Где $\overline{T}_1(\overline{x},\overline{t})$ - температура греющей среды, $\overline{T}_2(\overline{x},\overline{t})$ - температура стенки, $\overline{T}_3(\overline{x},\overline{t})$ - температура нагреваемой среды, $\overline{\alpha}_1$, $\overline{\alpha}_3$ - коэффициенты теплопередачи от греющей и нагреваемой среды к стенке; $\overline{P}$ - периметр поперечного сечения поверхности раздела сред; $\overline{S}_1$, $\overline{S}_3$ - площади поверхностного сечения греющей и нагреваемой среды; $\overline{S}_2$ - площадь поперечного сечения стенки; $\overline{C}_1$, $\overline{C}_3$ - теплоёмкости греющей и нагреваемой среды; $\overline{C}_2$ - теплоёмкость стенки; $\overline{\rho}_1$, $\overline{\rho}_3$ - плотность греющей и нагреваемой среды; $\overline{\rho}_2$ - плотность материала стенки; $\overline{a}$ - коэффициент температуропроводности стенки; $\overline{V}_1(t)$, $\overline{V}_3(t)$ - скорости греющей и нагреваемой сред. Знак «+» в правой части уравнения (3) соответствует прямотоку, знак «-» - противотоку взаимодействующих сред.

Систему уравнений (1) - (3) будем рассматривать при следующих граничных и начальных условиях.

Для прямотока:

для уравнения (1) граничные условия:

$$\overline{T}_1(0,\overline{t}) = \overline{T}_{1вх}(\overline{t}),\ \overline{t} \in [0,\infty) \quad (5)$$

начальные условия:

$$\overline{T}_1(\overline{x},0) = \overline{\gamma}_1(\overline{x}),\ \overline{x} \in [0,l]; \quad (6)$$

для уравнения (2) граничные условия:

$$\overline{T}_2(0,\overline{t}) = \overline{T}_{2вх}(\overline{t}),\ \overline{t} \in [0,\infty); \quad (7)$$

начальные условия:

$$\overline{T}_2(\overline{x},0) = \overline{\gamma}_2(\overline{x}),\ \overline{x} \in [0,l]; \quad (8)$$

для уравнения (3) граничные условия:

$$\overline{T}_3(0,\overline{t}) = \overline{T}_{3вх}(\overline{t}),\ \overline{t} \in [0,\infty); \quad (9)$$

начальные условия:

$$\overline{T}_3(\overline{x},0) = \overline{\gamma}_3(\overline{x}),\ \overline{x} \in [0,l]. \quad (10)$$

Для противотока:

для уравнения (1) граничные условия:

$$\overline{T}_1(0,\overline{t}) = \overline{T}_{1вх}(\overline{t}),\ \overline{t} \in [0,\infty); \quad (11)$$

начальные условия:

$$\overline{T}_1(\overline{x},0) = \overline{\gamma}_1(\overline{x}),\ \overline{x} \in [0,l]; \quad (12)$$

для уравнения (2) граничные условия:

$$\overline{T}_2(l,\overline{t}) = \overline{T}_{2вх}(\overline{t}),\ \overline{t} \in [0,\infty); \quad (13)$$

начальные условия:

$$\overline{T}_2(\overline{x},0) = \overline{\gamma}_2(\overline{x}),\ \overline{x} \in [0,l]; \quad (14)$$

для уравнения (3) граничные условия:

$$\overline{T}_3(l,\overline{t}) = \overline{T}_{3вх}(\overline{t}),\ \overline{t} \in [0,\infty); \quad (15)$$

начальные условия:

$$\overline{T}_3(\overline{x},0) = \overline{\gamma}_3(\overline{x}),\ \overline{x} \in [0,l]. \quad (16)$$

Приведём уравнения (1)-(4) к безразмерной форме.

Введём постоянные величины: $\overline{T}_0$, Δ_t, $\overline{V}_0$, l.

Тогда безразмерные переменные параметров представятся следующими соотношениями:

$$T_1 = \frac{\overline{T}_1}{\overline{T}_0};\quad T_2 = \frac{\overline{T}_2}{\overline{T}_0};\quad T_3 = \frac{\overline{T}_3}{\overline{T}_0};\quad x = \frac{\overline{x}}{l};\quad t = \frac{\overline{t}}{\Delta_t};\quad V_1 = \frac{\overline{V}_1 \cdot \overline{V}_0}{\overline{V}_0} \cdot \frac{\Delta_t}{l};\quad V_3 = \frac{\overline{V}_3 \cdot \Delta_t}{l};\quad K_1 = \overline{K}_1 \cdot \Delta_t;$$

$$K_2 = \overline{K}_2 \cdot \Delta_t,\ K_3 = \overline{K}_3 \cdot \Delta_t,\ K_4 = \overline{K}_4 \cdot \Delta_t,\ a = \overline{a} \cdot \frac{\Delta_t}{l};$$

где $\overline{T}_0$ - температура греющей среды в рабочей точке; Δ_t - максимальное время наблюдения процесса нагрева в теплообменнике.

Уравнения (1) - (3) будут иметь вид:

$$\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = -V_1(t)\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} + K_1\left(T_2(x,t) - T_1(x,t)\right), \quad (17)$$
$$t \in (0,\Delta_t), x \in (0,1);$$

$$\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = K_2\left[T_1(x,t) - T_2(x,t)\right] + K_3\left[T_3(x,t) - T_2(x,t)\right] + a\frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2}, \quad (18)$$
$$t \in (0,\Delta_t), x \in (0,1);$$

$$\frac{\partial T_3(x,t)}{\partial t} = \mp V_3(t)\frac{\partial T_3(x,t)}{\partial r} + K_4\left(T_2(x,t) - T_3(x,t)\right); \quad (19)$$
$$t \in (0,\Delta_t), x \in (0,1).$$

Для уравнения (17) граничные условия в безразмерной форме для прямотока и противотока

$$T_1(0,t) = T_{1вх}(t) \quad (20)$$

где $T_1(0,t) = \frac{\overline{T}_1(0,\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $T_{1вх}(t) = \frac{\overline{T}_{1вх}(\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $t \in [0,1]$;

начальные условия в безразмерной форме

$$T_1(x,0)=\gamma_1(x) \tag{21}$$

где $\gamma_1(x)=\dfrac{\overline{\gamma}_1(\overline{x})}{\overline{T}_0}$, $x\in[0,1]$.

Для уравнения (18) граничные условия в безразмерной форме

Для прямотока

$$T_2(0,t)=T_{2вх}(t) \tag{22}$$

где $T_2(0,t)=\dfrac{\overline{T}_2(0,\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $T_{2вх}(t)=\dfrac{\overline{T}_{2вх}(\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $t\in[0,1]$;

для противотока

$$T_2(l,t)=T_{2вх}(t), \tag{23}$$

где $T_2(l,t)=\dfrac{\overline{T}_2(l,\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $T_{2вх}(t)=\dfrac{\overline{T}_{2вх}(\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $t\in[0,1]$;

начальные условия в безразмерной форме

$$T_2(x,0)=\gamma_2(x) \tag{24}$$

где $\gamma_2(x)=\dfrac{\overline{\gamma}_2(\overline{x})}{\overline{T}_0}$, $x\in[0,1]$.

Для уравнения (19) граничные условия в безразмерной форме

Для прямотока

$$T_3(0,t)=T_{3вх}(t), \tag{25}$$

где $T_3(0,t)=\dfrac{\overline{T}_3(0,\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $T_{3вх}(t)=\dfrac{\overline{T}_{3вх}(\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $t\in[0,1]$;

для противотока

$$T_3(l,t)=T_{3вх}(t) \tag{26}$$

где $T_3(l,t)=\dfrac{\overline{T}_3(l,\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $T_{3вх}(t)=\dfrac{\overline{T}_{3вх}(\overline{t})}{\overline{T}_0}$, $t\in[0,1]$;

начальные условия в безразмерной форме

$$T_3(x,0)=\gamma_3(x) \tag{27}$$

где $\gamma_3(x)=\dfrac{\overline{\gamma}_3(\overline{x})}{\overline{T}_0}$, $x\in[0,1]$.

Ввиду того, что скорости V_1 и V_3 являются случайными функциями времени, уравнения (17) – (19) являются нелинейными.

Пусть

$$T_1(x,t)=T_{10}(x)+\Delta T_1(x,t) \tag{28}$$

$$T_2(x,t)=T_{20}(x)+\Delta T_2(x,t) \tag{29}$$

$$T_3(x,t)=T_{30}(x)+\Delta T_3(x,t) \tag{30}$$

$$V_1(t)=V_{10}+\Delta V_1(t) \tag{31}$$

$$V_3(t)=V_{30}+\Delta V_3(t) \tag{32}$$

Где V_{10} – статическая составляющая скорости греющей среды,

V_{30} – статическая составляющая скорости нагреваемой среды,

$\Delta V_1(t)$ - динамическая составляющая скорости греющей среды,

$\Delta V_3(t)$ - динамическая составляющая скорости нагреваемой среды,

$T_{10}(x)$ - статическая составляющая температуры греющей среды,

$\Delta T_1(x,t)$ - малое отклонение температуры греющей среды,

$T_{20}(x)$ - статическая составляющая температуры стенки,

$\Delta T_2(x,t)$ - малое отклонение температуры стенки,

$T_{30}(x)$ - статическая составляющая температуры нагреваемой среды,

$\Delta T_3(x,t)$ - малое отклонение температуры нагреваемой среды.

При этом $\Delta T_1(x,t) << T_{10}(x)$, $\Delta T_2(x,t) << T_{20}(x)$, $\Delta T_3(x,t) << T_{30}(x)$.

Линеаризуем уравнения согласно [7].

В результате получим уравнения статики:

$$-V_{10}(x)\frac{\partial T_{10}(x)}{\partial x}+K_1\left(T_{20}(x)-T_{10}(x)\right)=0 \tag{33}$$

$$K_2\left[T_{10}(x)-T_{20}(x)\right]+K_3\left[T_{30}(x)-T_{20}(x)\right]+\alpha\frac{\partial^2 T_{20}(x)}{\partial x^2}=0 \tag{34}$$

$$\pm V_{30}\frac{\partial T_{30}(x)}{\partial x}-K_4\left(T_{20}(x)-T_{30}(x)\right)=0 \tag{35}$$

Уравнения динамики:

$$\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t}=-\left(V_1(t)\frac{\partial T_{10}(x)}{\partial x}+V_{10}\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x}\right)+K_1\left(T_2(x,t)-T_1(x,t)\right) \tag{36}$$

$$\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t}=K_2\left[T_1(x,t)-T_2(x,t)\right]+K_3\left[T_3(x,t)-T_2(x,t)\right]+\alpha\frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} \tag{37}$$

$$\frac{\partial T_3(x,t)}{\partial t}=\mp\left(V_3(t)\frac{\partial T_{30}(x)}{\partial x}+V_{30}\frac{\partial T_3(x,t)}{\partial x}\right)+K_4\left(T_2(x,t)-T_3(x,t)\right) \tag{38}$$

Граничные условия:

для прямотока:

$T_{10}(0,t)=T_{1вх}(t)$ - греющий агент;

$T_{30}(0,t)=T_{3вх}(t)$ - нагреваемый агент;

$$\left.\begin{aligned}T_{20}(0,t)&=0\\ \frac{\partial T_{20}(0,t)}{\partial x}&=0\end{aligned}\right\}$$ - промежуточная стенка.

Для противотока:

$T_{30}(l,t)=T_{3вх}(t)$ - нагреваемый агент;

$$\frac{\partial T_{20}(0,t)}{\partial x}=0;$$

$$T_{20}(1,t)=0;$$

$T_{10}(0,t)=T_{1вх}(t)$ - греющий агент.

Согласно [2] статический режим подчиняется известным функциям, поэтому в дальнейшем рассматривается решение динамической части задачи.

Представление математической модели в спектральной форме.

Если положить, что $T_1(x,t)$, $T_2(x,t)$ и $T_3(x,t)$ вещественные, однозначные непрерывные и всюду дифференцируемые по пространственной переменной и времени функции, а также являются функциями, ограниченными с интегрируемым квадратом по пространственной переменной на рассматриваемом интервале $x \in [\bar{0}, \bar{1}]$, то такие функции можно разложить в ряд Фурье по системе ортонормированных функций $\{P(h,x)\}$, $n = \overline{1,\infty}$.

Представление функций $T_1(x,t)$, $T_2(x,t)$ и $T_3(x,t)$ с помощью ряда Фурье будет иметь вид

$$T_1(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_1(h,t) \cdot P(h,x), \tag{39}$$

$$\Phi_1(h,t) = \int_{\bar{0}}^{\bar{1}} T_1(x,t) \cdot P(h,x) dx, \tag{40}$$

$$h = \overline{1,\infty};$$

$$T_2(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_2(h,t) \cdot P(h,x), \tag{41}$$

$$\Phi_2(h,t) = \int_{\bar{0}}^{\bar{1}} T_2(x,t) \cdot P(h,x) dx, \tag{42}$$

$$h = \overline{1,\infty};$$

$$T_3(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_3(h,t) \cdot P(h,x), \tag{43}$$

$$\Phi_3(h,t) = \int_{\bar{0}}^{\bar{1}} T_3(x,t) \cdot P(h,x) dx, \tag{44}$$

$$h = \overline{1,\infty};$$

где $\bar{0} = 0 - \varepsilon$, $\bar{1} = 1 + \varepsilon$, ε - бесконечно малая величина.

На основании свойств спектральных характеристик [2], [3] перейдём от уравнений (36) - (38) к спектральной форме представления системы по пространственной переменной в виде бесконечный системы обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в форме Коши.

$$\dot{\Phi}_1 = -V_{10}\left(P_1\Phi_1 + \Gamma^{00}_{1T_1}\right) - V_1\left(P_1\Phi_{10} + \Gamma^{00}_{1T_{10}}\right) + K_1\left(\Phi_2 - \Phi_1\right), \tag{45}$$

$$\dot{\Phi}_2 = K_2\left(\Phi_1 - \Phi_2\right) + K_3\left(\Phi_3 - \Phi_2\right) + \alpha\left[P_2\Phi_2 + \Gamma^{00}_{2T_2} + \Gamma^{01}_{2T_2}\right], \tag{46}$$

$$\dot{\Phi}_3 = \mp V_{30}\left(P_1\Phi_3 + \Gamma^{01}_{1T_3}\right) \mp V_3\left(P_1\Phi_{30} + \Gamma^{01}_{1T_{30}}\right) + K_4\left(\Phi_2 - \Phi_3\right) \tag{47}$$

где Φ_1, Φ_2, Φ_3 - бесконечномерные вектора спектральных характеристик T_1, T_2, T_3, составленные из коэффициентов ряда Фурье на пространственном интервале существования объекта управления $x \in [0,1]$; $\Gamma^{00}_{1T_1}$, $\Gamma^{00}_{2T_2}$, $\Gamma^{01}_{2T_2}$, $\Gamma^{01}_{1T_3}$, $\Gamma^{00}_{1T_{10}}$, $\Gamma^{01}_{1T_{30}}$ - бесконечномерные вектора спектральных характеристик граничных условий ; P_1 - бесконечномерная квадратичная операционная матрица дифференцирования первого порядка, P_2 - бесконечномерная квадратичная операционная матрица дифференцирования второго порядка. Φ_{10}, Φ_{30}, - матрицы первых сомножителей размером $\left(\bar{h} \times \bar{h}\right)$.

Матрицы P_1, P_2, $\Gamma^{00}_{1T_1}$, $\Gamma^{01}_{1T_3}$, $\Gamma^{00}_{2T_2}$, $\Gamma^{01}_{2T_2}$, Φ_{10}, Φ_{30} определяются выражениями

$$P_1 = \int_{\bar{a}}^{\bar{b}} P(h,x)\frac{\partial P(\bar{h},x)}{\partial x}dx, \tag{48}$$

$$h = \overline{1,\infty},\ \bar{h} = \overline{1,\infty},$$

$$P_2 = \int_{\bar{a}}^{\bar{b}} P(h,x)\frac{\partial P(\bar{h},x)}{\partial x}dx, \tag{49}$$

$$h = \overline{1,\infty},\ \bar{h} = \overline{1,\infty},$$

$$\Gamma_{1T_1}^{00} = -\int_{\bar{a}}^{\bar{b}} \varphi_a^0(t)\delta(a-\xi)P(h,\xi)d\xi, \tag{50}$$

$$h = \overline{1,\infty},$$

$$\Gamma_{1T_3}^{01} = \int_{\bar{a}}^{\bar{b}} \varphi_b^0(t)\delta(\xi-b)P(h,\xi)d\xi, \tag{51}$$

$$h = \overline{1,\infty},$$

$$\Gamma_{2T_2}^{00} = -\int_{\bar{a}}^{\bar{b}} \varphi_a^0(t)\frac{\partial\delta(a-x)}{\partial x}P(h,x)dx,\ h = \overline{1,\infty}, \tag{52}$$

$$\Gamma_{2T_2}^{01} = \int_{\bar{a}}^{\bar{b}} \varphi_b^0(t)\frac{\partial\delta(x-b)}{\partial x}P(h,x)dx,\ h = \overline{1,\infty}, \tag{53}$$

$$\Phi_{10} = \int_{\bar{a}}^{\bar{b}} T_{10}(x)P(\bar{h},x)P(h,x)dx \tag{54}$$

$$h = \overline{1,\infty},\ \bar{h} = \overline{1,\infty},$$

$$\Phi_{30} = \int_{\bar{a}}^{\bar{b}} T_{30}(x)P(\bar{h},x)P(h,x)dx \tag{55}$$

$$h = \overline{1,\infty},\ \bar{h} = \overline{1,\infty},$$

где $a = 0$, $b = 1$ - нижняя и верхняя пространственные границы объекта управления; φ_a^0, φ_b^0 - амплитуды скачков (управлений) на границах $a = 0$ и $b = 1$

Вычислив (50)-(53), представим матричную систему уравнений (45)-(47) в следующем виде

$$\dot{\Phi}_1 = (-V_{10}P_1 - K_1E)\Phi_1 + K_1\Phi_2 + (-P_1\Phi_{10} - \Gamma_{1T_{10}}^{00})\cdot V_1 - V_{10}\Gamma_{1T_1}^{00}, \tag{56}$$

$$\dot{\Phi}_2 = K_2\Phi_1 + (a\cdot P_2 - K_3E - K_2E)\Phi_2 + K_3\Phi_3 + a\cdot[\Gamma_{2T_2}^{00} + \Gamma_{2T_2}^{01}], \tag{57}$$

$$\dot{\Phi}_3 = K_4\Phi_2 + (\mp V_{30}P_1 - K_4E)\Phi_3 \mp (P_1\Phi_{30} + \Gamma_{1T_{30}}^{01})\cdot V_3 \mp V_{30}\Gamma_{1T_3}^{01}, \tag{58}$$

где E - бесконечная единичная матрица.

Используя (56) - (58) представим объект управления в векторно-матричной форме Коши

$$\dot{\Phi}_0 = A\Phi_0 + BU + MV, \tag{59}$$

$$\mathrm{Y} = D\Phi_0, \tag{60}$$

$$\Phi_0(0) = colon\left(\Phi_0^{T_1(x,0)}, \Phi_0^{T_2(x,0)}, \Phi_0^{T_3(x,0)}\right), \tag{61}$$

где $\Phi_0 = colon(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3)$ - бесконечномерный вектор состояний с компонентами пространственных мод температуры греющей среды - Φ_1, стенки - Φ_2 и нагреваемой среды - Φ_3 ; $U = V_1$ - бесконечномерный вектор управлений, представленный бесконечномерным вектором

скорости греющей среды; $V = V_3$ - бесконечномерный вектор возмущений, представленный бесконечномерным вектором скорости нагреваемой среды; Y - бесконечномерная матрица выходных параметров объекта управления; D - бесконечномерная матрица, составленная из элементов ортонормированной системы разложения, вычисленных для фиксированных значений пространственных координат в интервале $x \in [0,1)$; $\Phi_0(0)$ - бесконечномерные числовые матрицы, определяемые выражениями

$$A = \begin{bmatrix} -V_{10}P_1 - K_1E & K_1E & \bar{0} \\ K_2E & a \cdot P_2 - K_3E - K_2E & K_3E \\ \bar{0} & K_4E & \mp V_{30}P_1 - K_2E \end{bmatrix}, \quad (62)$$

$$B = colon\left(-P_1\Phi_{10} - \Gamma^{00}_{1T_{10}}, \quad \bar{0}, \quad \bar{0}\right), \quad (63)$$

$$M = colon\left(\bar{0}, \quad \bar{0}, \quad \mp\left(P_1\Phi_{30} + \Gamma^{01}_{1T_{30}}\right)\right), \quad (64)$$

$$C = colon\left(-V_{10}\Gamma^{00}_{1T_1}, \quad \bar{0}, \quad \mp V_{10}\Gamma^{01}_{1T_1}\right), \quad (65)$$

где $\bar{0}$ - бесконечномерная квадратная матрица с элементами равными нулю.

Используя ряд Фурье, вернемся в пространственно-временную область.

$$T_1(x,t) = \sum_{\bar{h}=1}^{n} \Phi_1 P(\bar{h}, x) \quad (66)$$

$$T_2(x,t) = \sum_{\bar{h}=1}^{n} \Phi_2 P(\bar{h}, x) \quad (67)$$

$$T_3(x,t) = \sum_{\bar{h}=1}^{n} \Phi_3 P(\bar{h}, x) \quad (68)$$

В качестве ортонормированной системы разложения в ряд Фурье по пространственным переменным $P_1(h,x)$ была взята функция

$$P_1(h,x) = colon[\cos \pi x/2, \ \cos 3\pi x/2, \ \cos 5\pi x/2, \ ...], \ \left(h = \overline{1,\infty}\right),$$

ортогональна на интервале $x \in [0,1]$. Период первой гармоники системы T=4.

Нормирующие коэффициенты:

$$\mu_n = \sqrt{2} \ , \ \left(n = \overline{1,\infty}\right).$$

Ортонормированная система на интервале $x \in [0,1]$ примет вид

$$P_1(h,x) = colon\left[\sqrt{2}\cos \pi x/2, \ \sqrt{2}\cos 3\pi x/2, \ \sqrt{2}\cos 5\pi x/2, ...\right], \ \left(h = \overline{1,\infty}\right). \quad (69)$$

Для определения операционной матрицы дифференцирования воспользуемся следующей формулой [3]:

$$P_1\left(\bar{h}, h\right) = \int_{\bar{a}}^{\bar{b}} P\left(\bar{h}, x\right) \frac{\partial P(h,x)}{\partial x} dx \quad (70)$$

Синтез системы управления.

Распределенная система управления при ее рассмотрении по ограниченному числу мод *n* в спектральной области может быть представлена в спектральной форме следующим образом:

$$\dot{\Phi}_0 = A\Phi_0 + BU + MV \ , \quad (71)$$

$$y = D\Phi_0 \ , \quad (72)$$

$$\Phi_H = H \cdot y \ , \quad (73)$$

$$U = C \cdot \Phi_H, \quad (74)$$
$$x \in (\bar{0}, \bar{l}), t > 0$$

Φ_0 – матрица спектральных характеристик переменных состояния, размерностью $(n \times 1)$;

U – матрица управляющих воздействий, размерностью $(m \times 1)$;

V – матрица возмущающих воздействий, размерностью $(q \times 1)$;

A, B, M – матрицы коэффициентов, размерностью $(n \times n), (n \times m), (n \times q)$;

y – матрица измеряемых переменных, размерностью $(r \times 1)$;

D – матрица коэффициентов преобразования, размерностью $(r \times n)$;

Φ_H – матрица измеряемых спектральных характеристик, размерностью $(n \times 1)$;

H – матрица преобразования измеренных значений в спектральные характеристики, размерностью $(n \times r)$;

C – матрица коэффициентов регулятора, размерностью $(m \times n)$;

Все матрицы коэффициентов преобразования являются постоянными (т.е. состоят из элементов, не зависящих от времени).

В соответствии с (71)-(74), можно записать следующую структурную схему (Рисунок 1):

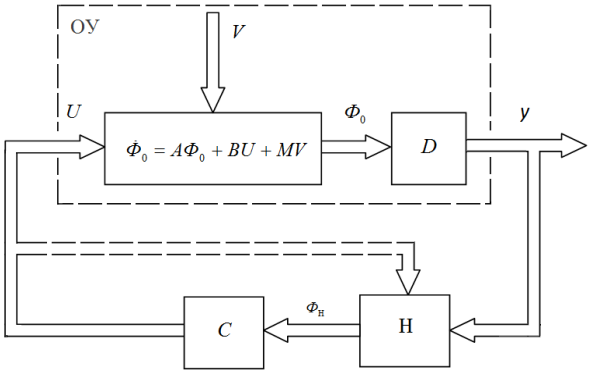


Рисунок 1. Структурная схема системы.

Н – Наблюдатель или устройство, преобразующее “y” в $\Phi_н$ – матрицу наблюдаемых (в спектральных характеристик), C – регулятор.

Синтез регулятора проведем по переменной Φ_0 на основе следящей системы [8], [9].

Моделирование решения

Для моделирования решения, были выбраны следующие параметры:

управляющим воздействием является скорость греющей среды. При этом скорость нагреваемой среды остаётся неизменной. Коэффициент температуропроводности стенки - $\chi = 7{,}22 \cdot 10^{-6}$ *м²/с.*; длина теплообменного аппарата - $l = 10$ *м.;* диаметр внутренней трубы $d_1 = 0.089$ *м.;* диаметр внешней трубы $d_3 = 0.127$ *м.;* толщина промежуточной стенки $h_2 = 0.005$ *м.;* теплоёмкости греющей и нагреваемой сред (вода) $C_1 = C_2 = 4200$ Дж/кг·град.; теплоёмкость промежуточной стенки (сталь) $C_3 = 420$ Дж/кг·град.; коэффициенты теплоотдачи греющей и нагреваемой сред $a_1 = a_2 =$ 5600 Вт/м²·град.; плотность греющей и нагреваемой сред $\rho_1 = \rho_2 = 1000$ кг/м³.; плотность промежуточной стенки $\rho_3 = 7679$ кг/м³.; статическая скорость греющей среды $V_{10} = 1$ *м/с.;* статическая скорость нагреваемой среды $V_{30} = 0.5$ *м/с.*, температура греющей среды на входе теплообменного аппарата $T_{1вх} = 100$ град., температура нагреваемой среды на входе теплообменного аппарата $T_{2вх} = 0$ град. Направление движения теплоносителя – противоток. Желаемое значение температуры нагреваемой среды в точке $T_3(0,t) = 50$ град. $T_0 = 100$ град.

Начальное распределение температур греющей и нагреваемой сред:

$$T_{10} = [50 \quad 45 \quad 40 \quad 35 \quad 30 \quad 25 \quad 20 \quad 15 \quad 10],$$

$$T_{30} = [0 \quad 2 \quad 6 \quad 10 \quad 12 \quad 16 \quad 18 \quad 20 \quad 22].$$

Моделирование (71) – (74) показало, что время регулирования составило 3 секунды. При этом после перехода температуры в установившееся состояние, увеличение скорости греющей среды на 15% показало, что ошибка регулирования составляет менее 5%.(Рисунок 2, 3).

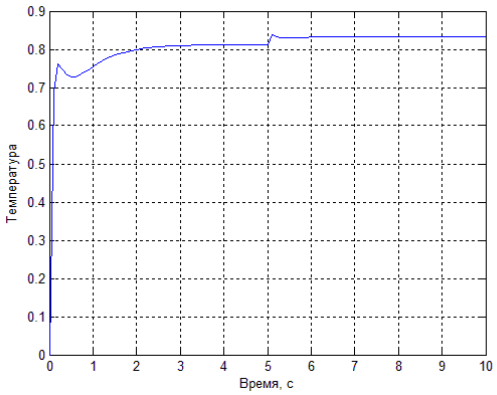


Рисунок 2. График переходного процесса греющей среды в точке $T_1(0,t)$.

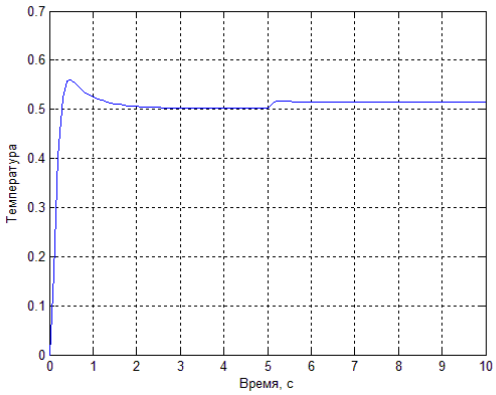


Рисунок 3. График переходного процесса нагреваемой среды в точке $T_3(0,t)$.

Заключение.

В работе была рассмотрена задача о процессе теплообмена в теплообменном аппарате типа «труба в трубе». Используя спектральный метод, был осуществлён переход математической модели к спектральной форме представления системы по пространственной переменной в виде бесконечный системы обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в форме Коши. Используя пакет прикладных программ Matlab, был синтезирован регулятор для стабилизации температуры нагреваемой среды. Моделирование переходных процессов показало, что ошибка регулирования не превышает 5%. Учёт таких второстепенных факторов, как температуропроводность промежуточной стенки позволят повысить точность при расчёте и проектировании теплообменных аппаратов. А система стабилизации температуры среды позволит уменьшить

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль В.А., Торгашова О.Ю., Соломин М.А., «Распределённая система управления нестационарным теплообменным процессом», журнал Академии Военных Наук, Саратов: Академия военных наук (Поволжское отделение), 2015. № 2(66). С. 45-48.

2. Коваль В.А. Спектральный метод анализа и синтеза распределённых систем: учебное пособие. Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. –145с.

3. Торгашова О.Ю. Анализ и синтез пространственно многомерных распределенных систем с учетом дескрипторной структуры представления на основе спектрального метода: диссертация доктора технических наук: 05.13.01. Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю. А., 2016.- 386 с.

4. Девятов Б.Н. Определение динамических характеристик и критериев инерционности и регулируемости химико-технологических аппаратов. Автомат и телемех. 1960. Выпуск 6, том 21. С.779-790.

5. Девятов Б.Н., Демиденко Н.Д. Теория и методы анализа управляемых распределённых процессов. Новосибирск: Наука, 1983. – 271 с.

6. А.М. Прохоренков. Моделирование процессов теплообмена, протекающих в пластинчатых теплообменных аппаратах. Вестник МГТУ, 2014 г. № 1, том 17. С.92-101.

7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. СПб.: Профессия, 2003. — 752 с.

8. Садомцев Ю.В. Конструирование систем управления с обратной связью по критериям точности и грубости. Саратов: СГТУ им Гагарина Ю.А., 2003.– 208с.

9. Коваль В.А., Самарский А.А., Соломин М.А., Степанов М.Ф., Торгашова О.Ю. Синтез системы стабилизации температурного поля установки нагрева стеклоизделий. Современные наукоемкие технологии, 2017 г. № 12. С. 29-36.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-376-383

Першин Иван Митрофанович (1,2), Русак Светлана Николаевна (1),
Цаплева Валентина Викторовна (1).

1. Северо-Кавказский федеральный университет,
2. Санкт-Петербургский электротехнический университет (ЛЭТИ).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШАГА ДИСКРЕТИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Аннотация. *Многие технологические процессы изменяются не только во времени, но и по пространственным координатам. Рассматриваемые процессы относятся к классу распределенных объектов. Математические модели распределенных объектов описываются уравнениями в частных производных. При исследовании рассматриваемых объектов, в основном используют численные методы решения математических моделей. При выборе шага дискретизации по пространственным координатам, должны учитывать следующее: - уменьшение шага дискретизации приводит к более точному описанию функции входного воздействия и функции выхода рассматриваемого объекта управления;- уменьшение шага дискретизации приводит к увеличению объемов требуемого машинного времени для проведения расчетов. Поскольку для проектирования распределенных систем управления используются статические и динамические характеристики распределенных объектов по выбранным пространственным модам , то рассмотрим влияние шага дискретизации на статические и динамические характеристики. Как известно, выбор шага дискретизации по времени осуществляется исходя из обеспечения устойчивости вычислительной схемы.*

Ключевые слова*: Распределенные объекты; дискретные математические модели; пространственные координаты шаг дискретизации.*

Description. *Many technological processes change not only in time, but also in spatial coordinates. The processes under consideration belong to the class of distributed objects. Mathematical models of distributed objects are described by partial differential equations. In the study of the objects in question, mainly using numerical methods for solving mathematical models. When choosing a sampling step by spatial coordinates, the following should be taken into account: -reduction of the sampling step leads to a more accurate description of the input and output functions of the control object under consideration;- reduction of the sampling step leads to an increase in the volume of the required machine time for calculations . Since the design of distributed control systems uses static and dynamic characteristics of distributed objects according to the selected spatial modes , we consider the effect of the discretization step on the static and dynamic characteristics. As you know, the choice of the discretization step in time is based on the stability of the computational scheme.*

Keywords: *Distributed objects; discrete mathematical models; spatial coordinates of the sampling rate.*

Введение.

Численные метода решения нашли широкое распространение в практике. Такие задачи для тепловых и гидролитосферных процессов рассмотрены [1-18] . Исследование устойчивости вычислительных схем, применительно к объектам с распределенными параметрами, приведено в [1].

В[13-15] показаны нестандартные распределенные звенья, используемые для аппроксимации динамических характеристик распределенных объектов. Нестандартные распределенные звенья используются в процедуре синтеза распределенных регуляторов [4-

7,11,12] . От точности определения статических и динамических характеристик распределенного объекта зависит и качество спроектированной распределенной системы управления.

Влияние шага дискретизации математических моделей по пространственным координатам на статические и динамические характеристики распределенных объектов. Влияние шага дискретизации на характеристики дискретных моделей распределенных объектов рассмотрим на примере приведенном в статье «Коррекция математических моделей распределенных объектов» (приведенная в настоящем сборнике).

Математическая модель объекта описывается уравнением:

$$\frac{\partial T(\mathrm{x,y,z},\tau)}{\partial \tau} = a\cdot\left(\frac{\partial^2 T(\mathrm{x,y,z},\tau)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T(\mathrm{x,y,z},\tau)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T(\mathrm{x,y,z},\tau)}{\partial z^2}\right), \qquad (1)$$

$$0<\mathrm{x}<\mathrm{X_L}, 0<\mathrm{y}<\mathrm{Y_L}, 0<\mathrm{z}<\mathrm{Z_L},$$

где $T(x,y,z,\tau)$ - фазовая переменная; *x, y, z,* - пространственные координаты; τ-время; X_L=0.8; Y_L=0.5; Z_L=0.16.

Граничные и начальные условия для уравнения (1) зададим в виде:

$$T(0,y,z,\tau)=T(x,0,z,\tau)=T(x_L,y,z,\tau)=T(x,y_L,z,\tau)=0,$$

$$\frac{\partial T(x,y,0,\tau)}{\partial z}=0\ ,\ \lambda\cdot\partial T(x,y,z_L,\tau)/\partial z=U(x,y,\tau),\ T(x,y,z,0)=0.$$

Функция выхода − значение температурного поляT(x,y,z^*,τ) , z^*=0.1

Значения параметров *a*,λ (в системе «СИ») равны: *a*=0.0015; λ=0.23 .

Схема объекта приведена на рис.1.

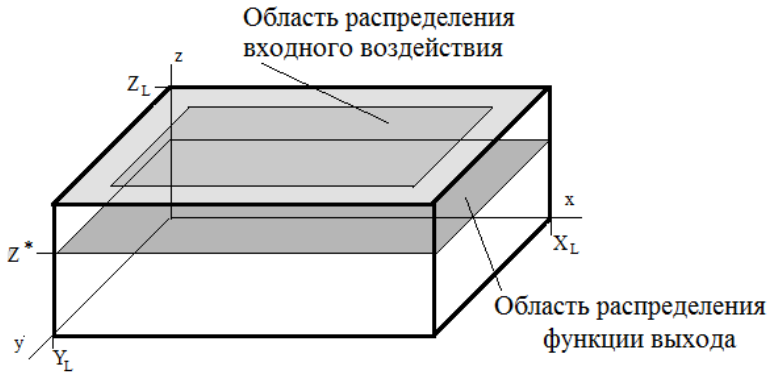


Рис. 1. Схема объекта

При составлении дискретной модели положим: число точек дискретизации и по координатам *x,y,z* выбрано равным:

$$N_x=16,\ (\eta=1\ldots N_x);\ N_y=16,\ (\gamma=1\ldots N_y);\ N_z=17,(\xi=1\ldots N_z).$$

Шаги дискретизации определялись из соотношений:

$$\Delta x=X_L/(N_x-1);\quad \Delta y=Y_L/(N_y-1);\quad \Delta z=Z_L/(N_z-1).$$

Дискретная модель объекта (1) записывается в виде:

$$\frac{\Delta T_{\eta,\gamma,\xi}(\tau)}{\Delta\tau}=a\cdot\left(\frac{T_{\eta-1,\gamma,\xi}(\tau)-2\cdot T_{\eta,\gamma,\xi}(\tau)+T_{\eta+1,\gamma,\xi}(\tau)}{\Delta x^2}\right.$$

$$\left.\frac{T_{\eta,\gamma-1,\xi}(\tau)-2\cdot T_{\eta,\gamma,\xi}(\tau)+T_{\eta,\gamma+1,\xi}(\tau)}{\Delta y^2}+\frac{T_{\eta,\gamma,\xi-1}(\tau)-2\cdot T_{\eta,\gamma,\xi}(\tau)+T_{\eta,\gamma,\xi+1}(\tau)}{\Delta z^2}\right),$$

$$\eta=1,\ldots N_x;\gamma=1,\ldots N_y;\xi=1,\ldots N_z.$$

Шаг интегрирования по времени выбирается исходя из устойчивости вычислительной схемы [1].

Дискретные аналоги граничных условий записываются в виде следующих соотношений:

$$T_{1,\gamma,\xi}(\tau)=T_{\eta,1,\xi}(\tau)=T_{Nx,\gamma,\xi}(\tau)=T_{\eta,Ny,\xi}(\tau)=0,(\eta=1,\dots N_x;\gamma=1,\dots N_y;\xi=1,\dots N_z),$$

$$T_{\eta,\gamma,Nz}(\tau)=T_{\eta,\gamma,Nz-1}(\tau),(\eta=1,\dots N_x;\gamma=1,\dots N_y),$$

$$\partial T_{\eta,\gamma,1}(\tau)=(\Delta z/\lambda)\cdot U_{\eta,\gamma}(\tau),(\eta=2,\dots N_x-1;\gamma=2,\dots N_y-1).$$

На рис.2 показана область формирования входного воздействия

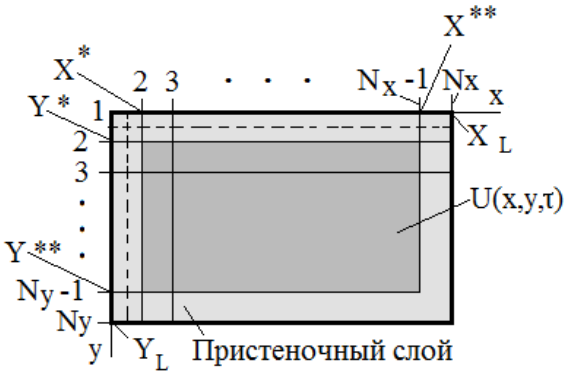


Рис.2. Формирование входного воздействия

На рис. 1, X^* X^{**} Y^* Y^{**} − границы области распределения входного воздействия, которые остаются постоянными при проведении численного эксперимента. При моделировании температурных полей рассматриваемого объекта будем полагать, что пристеночные области описываются граничными условиями второго рода (теплоизолированы).

В соответствии с граничными условиями, входное воздействие представим в виде ряда

$$U(x,y,\tau)=\sum_{\eta,\gamma=1}^{\infty}C_{\eta,\gamma}(\tau)\cdot\sin(\psi_\eta\cdot x)\cdot\sin(\tilde{\varphi}_\gamma\cdot y),$$

$$\psi_\eta=\pi\cdot\eta/X_L,\ \tilde{\varphi}_\gamma=\pi\cdot\gamma/Y_L, \qquad (2)$$

$$X^*\le x\le X^{**},Y^*\le y\le Y^{**}.$$

Статические и динамические характеристики будем определять с использованием реакции объекта на первую пространственную моду

$$U(x,y,\tau)=10\cdot\sin(\psi_\eta\cdot x)\cdot\sin(\tilde{\varphi}_\gamma\cdot y),$$

$$\psi_\eta=\pi\cdot 1/X_L,\ \tilde{\varphi}_\gamma=\pi\cdot 1/Y_L,$$

$$X^*\le x\le X^{**},Y^*\le y\le Y^{**}.$$

Статический коэффициент усиления по первой пространственной моде получен в статье «Коррекция математических моделей распределенных объектов» и равен $K=T_{8,8,11}(\tau\to\infty)/U_{8,8}(\tau\to\infty)=0.5439$, а время запаздывания $\tau_з=8.45$, при этом $N_x=16$, $N_y=16$, $N_z=17$.

Осуществим следующий численный эксперимент: введем параметр **nn**, который показывает, во сколько раз возросло число интервалов дискретизации по соответствующим координатам при описании дискретной модели объекта . Вычисленные значения Nx^*,Ny^*,Nz^* определяются следующим образом:

$$N_x^*=(N_x-1)*nn+1;\ (\eta=1\dots N_x);$$
$$N_y^*=(N_y-1)*nn+1;\ (\gamma=1\dots N_y);$$
$$N_z^*=(N_z-1)*nn+1;\ (\xi=1\dots N_z).$$

Алгоритм формирования статического входного воздействияимеет вид:

```
for x:=nn+1 to Nx-(nn+1) do
for y:=nn+1 to Ny-(nn+1) do  begin
fx:=3.14*1*(x-1)/(nx-1);
fy:=3.14*1*(y-1)/(Ny-1);
U1[x,y]:=10*sin(fx*(x-1) * Δx)*sin(fy * (y-1)* Δy);
T[x,y,Nz*]:=U1[x,y]*Δz/λ+T[x,y, Nz*-1] ;
end;
```

Алгоритм формирования динамического входного воздействия:

```
for x:=nn+1 to Nx-(nn+1) do
for y:=nn+1 to Ny-(nn+1) do  begin
fx:=3.14*1*(x-1)/(nx-1);
fy:=3.14*1*(y-1)/(Ny-1);
U1[x,y]:=10*sin(fx*(x-1) * Δx)*sin(fy * (y-1)* Δy)*sin(0.1*τ);
T[x,y,Nz*]:=U1[x,y]*Δz/λ+T[x,y, Nz*-1] ;
end;
```

Алгоритм формирования динамического входного воздействия:

```
for x:=nn+1 to Nx-(nn+1) do
for y:=nn+1 to Ny-(nn+1) do  begin
fx:=3.14*1*(x-1)/(nx-1);
fy:=3.14*1*(y-1)/(Ny-1);
U1[x,y]:=10*sin(fx*(x-1) * Δx)*sin(fy * (y-1)* Δy)*sin(0.1*τ);
T[x,y,Nz*]:=U1[x,y]*Δz/λ+T[x,y, Nz*-1] ;
end;
```

Вычисление координат функции выхода($T(\tau)_{8,\ 8,\ 11}$) , для рассматриваемой задачи ($T_{nnx,nny,nnz}$), осуществляется по следующему алгоритму

```
nnx:=(8-1)*NN+1;
nny:=(8-1)*NN+1;
nnz:=(11-1)*NN+1;
```

Для различных значений параметра **nn** были определены статические и динамические характеристики объекта. Для nn=1→K=0.5439; временное запаздывание Δτ=8.45 (см. статью «Коррекция математических моделей распределенных объектов»).

K=0.62888

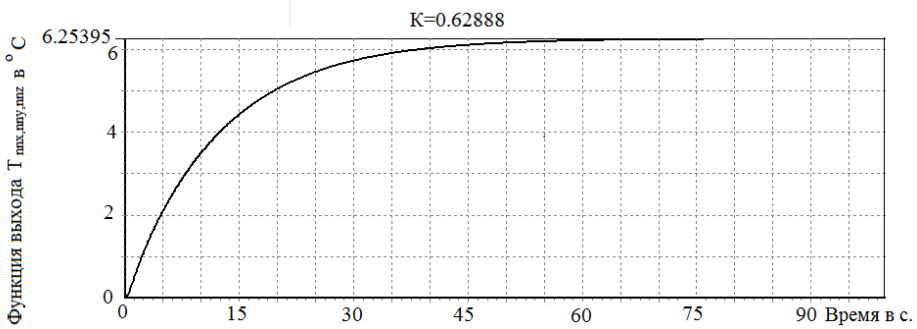


Рис.3. График переходного процесса, nn=2

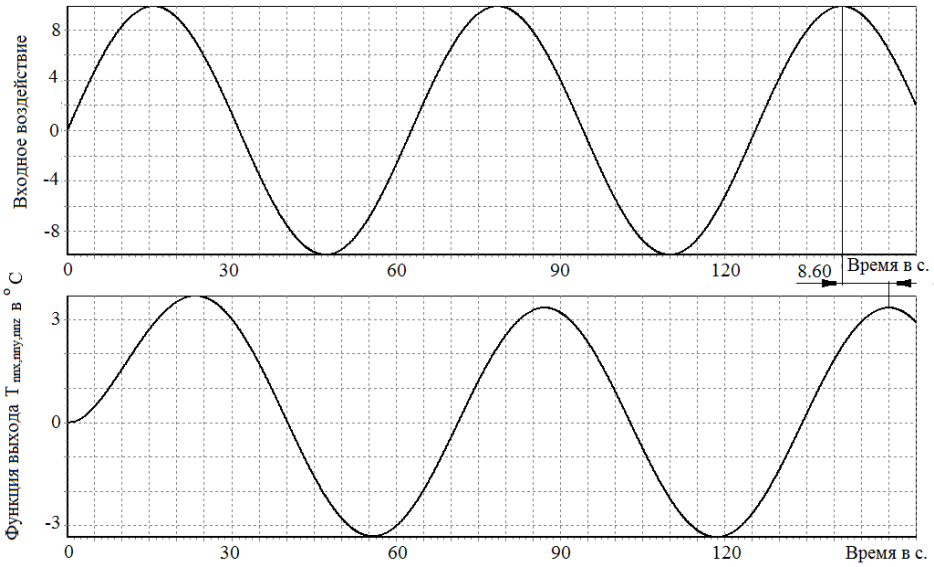


Рис. 4. Реакция объекта на динамическое входное воздействие, nn=2

K=0.61182

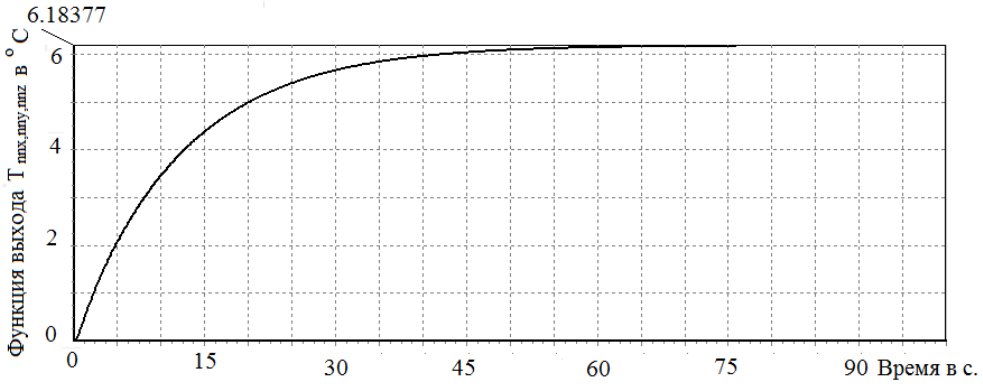


Рис.5. График переходного процесса, nn=3

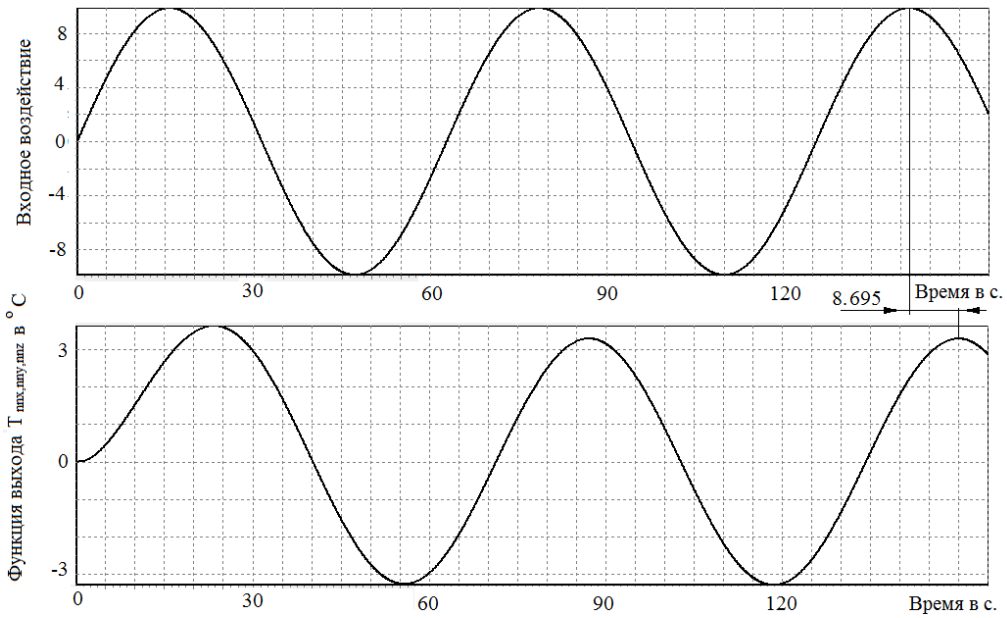


Рис. 6. Реакция объекта на динамическое входное воздействие, nn=3

K=0.61834

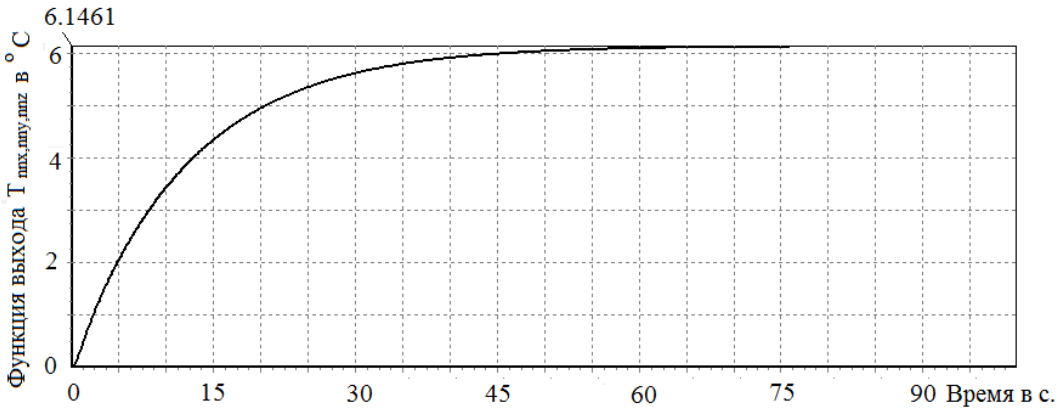


Рис.7. График переходного процесса, nn=4

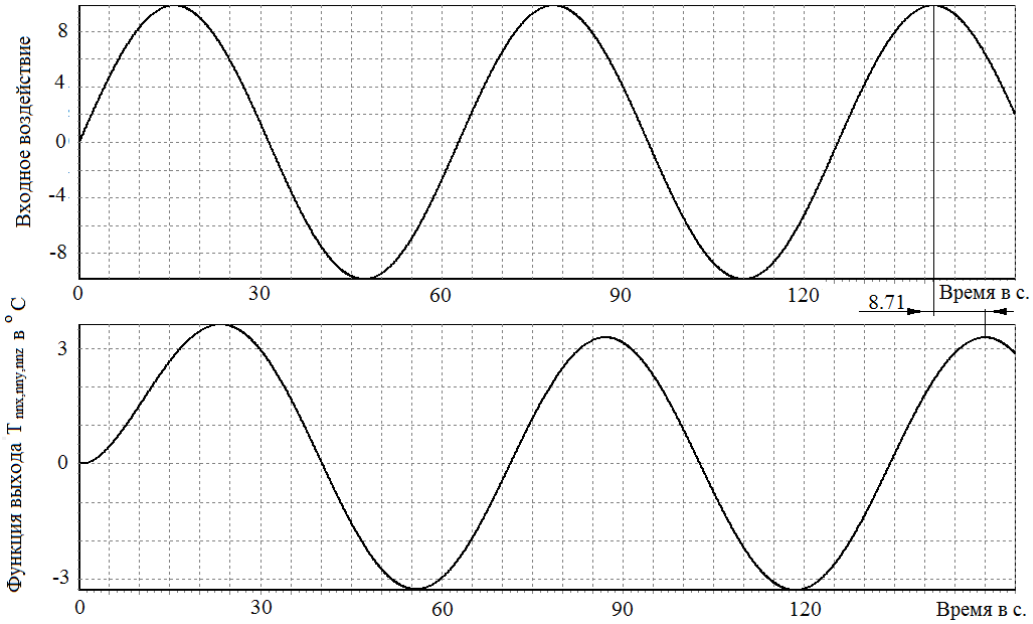


Рис. 8. Реакция объекта на динамическое входное воздействие, nn=4

K=0.51399

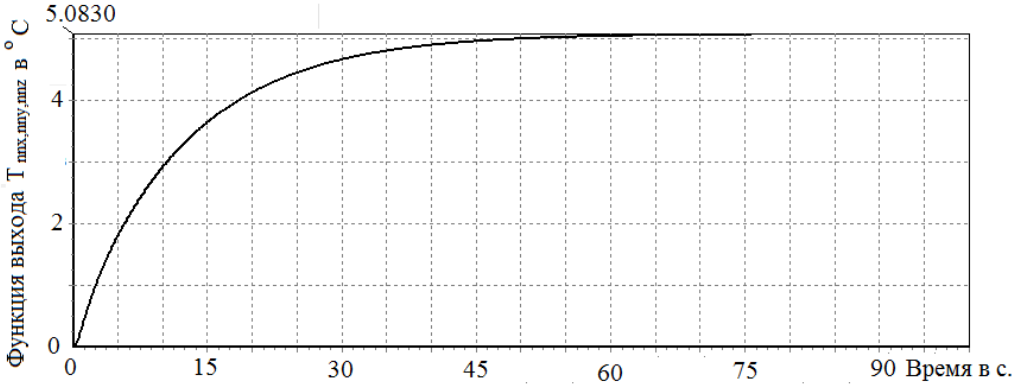


Рис.7. График переходного процесса, nn=5

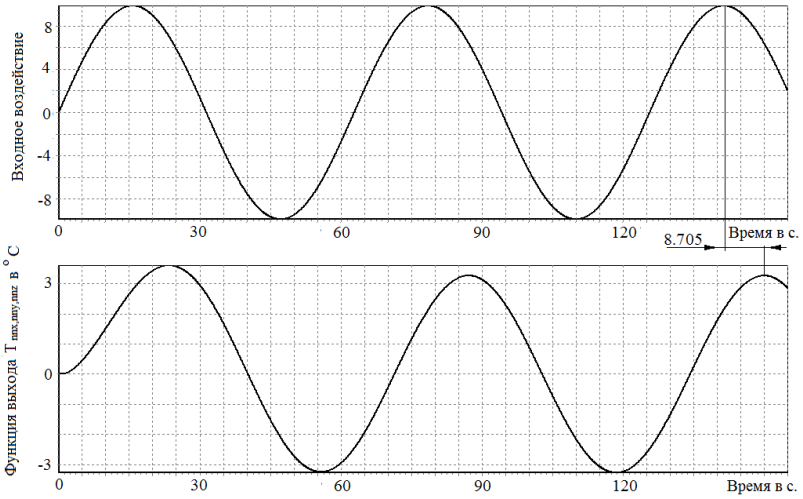


Рис. 8. Реакция объекта на динамическое входное воздействие nn=5

Результаты моделирования сведены в таблицу 1.

Табл.1. Изменение характеристик дискретной модели распределенного объекта

NN	Статический коэфф. передачи (K)	Время запаздывания в с.
1	0.5439	8.45
2	0.62888	8.60
3	0.61182	8.695
4	0.61834	8.71
5	0.51399	8.705

Заключение.

При моделировании распределенных объектов (систем), на сегодняшний день не существует методики выбора шага дискретизации по пространственным координатам. Иногда выбор шага дискретизации обусловлен спектром пространственных мод, который реализуется в физической системе. Иногда выбор шага дискретизации связан с конструктивными особенностями объекта. В рассматриваемом случае, при

nn=1, матрица, описывающая температурное поде объекта в каждый момент времени записывается в виде трехмерной матрицы $T_{16\cdot16\cdot17}$, а при nn=5 $T_{76\cdot76\cdot81}$. Такие увеличения размеров матриц приводят к существенному увеличению машинного времени для проведения расчетов.

Известно, что для проектирования распределенных систем управления используются аппроксимационные модели, отражающие статические и динамические характеристики распределенных объектов. Результаты моделирования показывают (см табл.1), что эти характеристики изменяются несущественно.

СПИОСК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности – М.: Высшая школа, 1967 – 599 с.
2. Воронин А.Ю. Першин И.М. Математическое моделирование магнитных полей тороидальной камеры// Мехатроника, автоматизация, , управление. 2006.№8.
3. Першин И.М. Исследование электромагнитных полей объемных резонаторах пирамидального вида// Известия ЮФУ. Технические науки.№6, июнь 2011. Таганрог: Изд-во ТТИЮФУ. С.171-180.
4. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Из-во РИА КМВ. 2007. 243с

5. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. -М.: Научный мир,2012.-476с.

6. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С., Першин М.И., Уткин В.А., Королев Б.И., Дубогрей В.Ф., Хмель В.В.Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод.*Системный анализ, диагностика, прогноз и управление*.Москва, Наука 2015.283с.

7. Першин И.М. ,Первухин Д.А., Ильюшин Ю.В., Афанасьева О.В.Проектирование распределенных систем управления гидролитосферными процессами. Синтез распределенных систем управления. Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики:IPDME-2017.Сб. трудов международной научно-практической конференции. РИЦ Санкт-Петербургского горного университета. С. 189-195.

8. Першин И.М., Малков А.В. ,М.И. Першин. Математические модели гидролитосферных процессов. Недропользование XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал № 3 2018. С.56-65.

9. Pershin I.M., Pervukhin D A, Ilyushin Y V ,O V Afanaseva. Design of distributed systems of hydrolithospere processes management. Selection of optimal number of extracting wells. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032030 d o i :10.1088/1755-1315/87/3/032030. p.p.1-6.

10. Малков А.В., Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Автоматизация технологических процессов добычи гидроминерального сырья. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2018, № 5 (199). С.198-210

11. Першин М.И. Проектирование системы управления параметрами Кисловодского месторождения минеральных вод.// 2-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых СКФУ "Университетская наука - региону"Т.1 2014. С.143-156.

12. Першин М.И., Веселов Г.Е. Методы построения систем управления Гидролитосферными процессами.//Современная наука и инновации. Научный журнал. Выпуск №3(19),2017. С. 35-45.- региону» (3-21 апреля). – Пятигорск: Изд-во ПФ СКФУ, 2017. – Т1. С. 138-143.

13. Першин М.И., Исследование погрешностей динамических характеристик распределенных объектов при аппроксимации.// Современная наука и инновации . Научный журнал. Выпуск №4(8),2014. С. 46-50.

14. Першин М.И., Веселов Г.Е., Першин И.М. Методы аппроксимации

15. передаточных функций распределенных объектов.//СИСТЕМНЫЙ СИНТЕЗ И ПРИКЛАДНАЯ СИНЕРГЕТИКА.Сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции (5–9 октября 2015 г., Россия, г. Таганрог). Издательство ЮФУ . ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44. С.106-117.

16. Першин М.И., Веселов Г.Е., Першин И.М. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов. //Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015, № 7 (168). С. 126-138

Pershin I. M., Drovosekova, T.I. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskiye Mineralnye Vody (caucasus mineral springs)// Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. 7519732.Pp215-217/

17. Pervukhin D. A., Pershin I. M. , Ilyushin Y. V., Afanaseva O. V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems// IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87(2017) 032029 d o i :10.1088/1755-1315/87/3/032029/ Pp. 1-6.

18. Pershin I. M. ,Drovosekova T. I., Malkov A.M. The Study of Periodic Effects on on Parameters of Hydrolytospheric Processes//2019 International Science and Technology Conference"EastConf"978-1-7281-1931-1/19/$31.00 ©2019 IEEE. Pp. 1-7

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-384-392

Статкевич Анастасия Вячеславовна, Ляшенко Александр Леонидович

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА НА БАЗЕ ARDUINO

Аннотация. *В данной работе целью ставится разработать систему управления микроклиматом в помещении. В процессе решения поставленной задачи разрабатывается структурная схема системы управления микроклиматом на примере цветочной оранжереи. Осуществлён выбор элементной базы, на основе которой производится техническая реализация разрабатываемой системы управления. Составлен алгоритм работы данной системы и разработано программное обеспечение обеспечивающие функционирование системы. Также решен вопрос с архивированием параметров системы и вывода текущей информации оператору.*

Ключевые слова: *микроклимат, система управления, Arduino, контроль, диагностика, управление, микроконтроллер, алгоритм, программирование, управление.*

Annotation. *In this paper, the goal is to develop a system of climate control in the room. In the process of solving the task, a block diagram of the climate control system is developed on the example of a flower greenhouse. The choice of the element base on the basis of which the technical implementation of the developed control system is carried out. An algorithm for the operation of this system has been compiled and software has been developed to ensure the functioning of the system. The issue of archiving system parameters and outputting current information to the operator was also resolved.*

Keywords*: microclimate, control system, Arduino, control, diagnostics, control, microcontroller, algorithm, programming, control.*

Введение

Цветочная оранжерея представляет собой сложное инженерное сооружение, которое обеспечивает контроль над климатическими параметрами, влияющими на процессы, протекающие в растениях.

Для разработки системы управления предназначенной для автоматического управления основными видами технологических систем жизнеобеспечения растений и поддержания микроклимата рассмотрим элементную базу и выберем наиболее подходящие приборы для реализации данной системы, рассмотрим различные средства разработки программного обеспечения и разработаем программный код, рассмотрим алгоритмы управлении и выберем наиболее подходящий [1].

Результатом работы является аппаратно-программный продукт, базис которого мы можем использовать для системы управления (СУ) микроклиматом цветочной оранжереи, которая способна контролировать климатические параметры в заданном пользователем диапазоне.

Постановка задачи

Для выращивания цветов или сельхозпродукции широко применяют парники, оранжереи и теплицы различной конструкции. В процессе выращивания растений часто возникают трудности при поддержании требуемого микроклимата в сооружении. Положение может усугубляться отсутствием обслуживающего персонала в течение определенного времени. Вследствие чего возможно замерзание растений при снижении температур в рабочих зонах таких

сооружений, но и увядание их при перегреве из-за высокого уровня солнечной радиации в оранжерее или парнике в дневные часы.

Микроклимат - это климатические условия, созданные искусственным путём в закрытых помещениях, для защиты от неблагоприятных внешних воздействий и создания зоны комфорта.

Современные системы управления микроклиматом состоят из множества устройств, отвечающих за выполнение определенных задач. Для автоматизации процесса поддержания микроклимата растений в теплице или оранжерее, необходимо контролировать и регулировать множество различных параметров, таких как: температура и влажность воздуха, влажности почвы, освещенность, допустимое значение температуры воздуха, допустимое значение влажности воздуха и многие другие.

На основании проведённых обзоров существующих способ реализации систем управления микроклиматом в цветочной оранжерее, было решено проводить разработку системы управления микроклиматом на основе аппаратной платформы Arduino.

Arduino - это электронный конструктор, а также удобная платформа быстрой разработки электронных устройств для новичков и профессионалов. Платформа популярна во всем мире благодаря удобству и простоте языка программирования, открытой архитектуре и программному коду. Устройство программируется через USB без использования программаторов.

Микроконтроллеры для Arduino отличаются наличием предварительно прошитого в них загрузчика. Благодаря этому загрузчику пользователь загружает свою программу в микроконтроллер без использования традиционных отдельных аппаратных программаторов. Загрузчик соединяется с компьютером через интерфейс USB или с помощью отдельного переходника UART-USB. Поддержка загрузчика встроена в Arduino IDE и выполняется в один щелчок мыши.[2]

Разрабатываемая система должна позволять оператору отслеживать состояние микроклимата в цветочной оранжерее. Также автоматически подключать исполнительные механизмы для регулирования параметров микроклимата системы.

Структурная схема системы управления

В разрабатываемой СУ микроконтроллер – это ядро системы, он получает данные с датчиков, которые регистрируют изменение параметров, и вырабатывает управляющие воздействие. Для каждого параметра нам необходимо подобрать советующие датчики и исполнительные механизмы для осуществления управления.

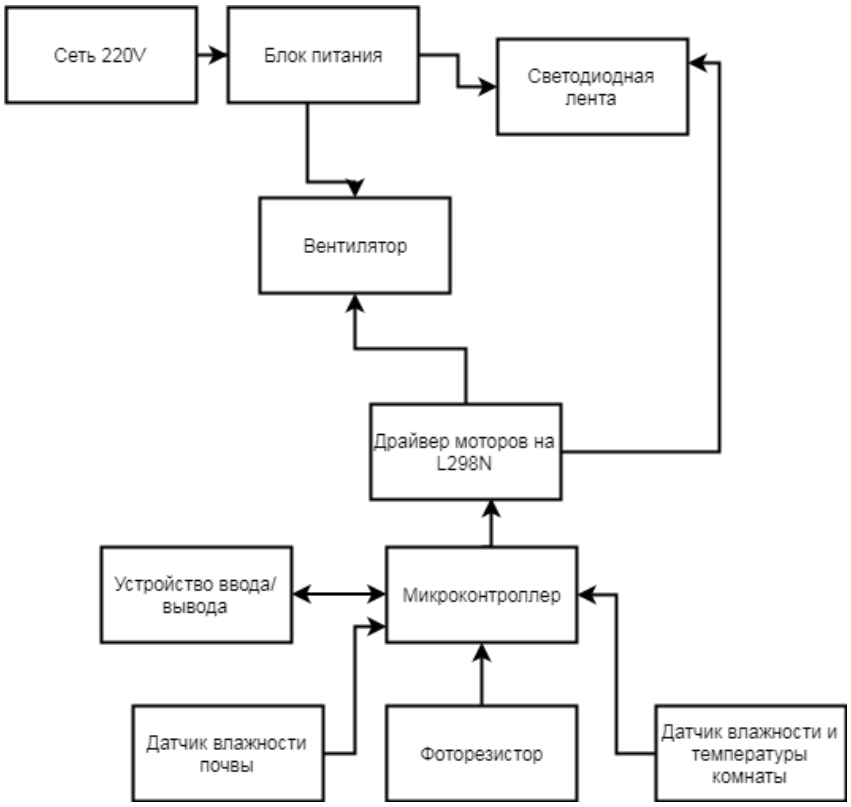


Рисунок 1 - Структурная схема системы управления микроклиматом в цветочной оранжереи

На рис.1 представлена упрощённая структурная схема системы управления микроклиматом, по которой можно увидеть взаимосвязь между различными элементам системы. На датчиках собирается информация, которая поступает в микроконтроллер. После обработки информации, на драйвер поступают команды управления от микроконтроллера на включение/выключение вентилятора или светодиодной ленты. Происходит регулировка скорости вращения вентилятора, напряжения на светодиодной ленте, в зависимости от показателей датчиков [3]. Благодаря устройству ввода/вывода происходит информирование оператора о текущем состоянии микроклимата в цветочной оранжерее.

Выбор элементной базы

Для осуществления контроля рассмотрим основные датчики и платы для реализации СУ.

1. Arduino UNO R3. Это платформа на базе микроконтроллера семейства AVR Atmega328, что соответствует заранее выбранному микроконтроллеру. Внешний вид платформы представлен на рис.2. [5,6]

Рисунок 2 - Arduino UNO R3

2. Датчики влажности и температуры DHT11 и DHT22.

Выбранные DHT11/DHT22 (рис. 3) – популярные датчики определения относительной влажности и температуры. Включают в себя емкостной датчик влажности, термистор и АЦП для преобразования аналоговых значений влажности и температуры.[4]

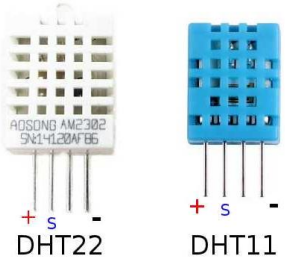


Рисунок 3 - Датчики DHT22 и DHT11

По техническим характеристикам датчиков DHT11 и DHT22 можно сказать, что для уличных условий лучше всего подходит DHT22, а для комнатной оранжереи и пробного макета можно использовать датчик DHT11.

3. Для определения влажности почвы рассмотрим простой в эксплуатации модуль датчика FC-28 (рис. 4).

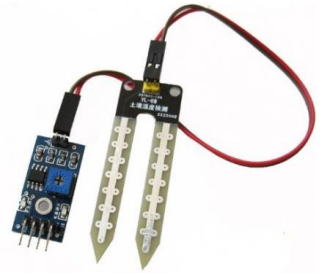


Рисунок 4 - Модуль датчика влажности FC-28

В модуль встроен потенциометр для управления чувствительностью датчика.

4. Для определения освещенности помещения можно установить самый обычный фоторезистор MLG5515B (рис. 5). Данный датчик позволяет наиболее точно и легко измерить уровень освещенности окружающей среды.

Рисунок 5 - Фоторезистор MLG5515B

Техническая реализация системы

В процессе реализации системы управления микроклиматом в цветочной оранжерее необходимо учесть фактор того, что макет должен быть функционален, имитировать работу всех датчиков и исполнительных механизмов, также быть простым в эксплуатации и финансово не затратным.

Подключение датчика DHT11 показано на рис.6. Заметим, что второй вывод датчика мы подключаем не только ко второй линии GPIO на Arduino, но еще и к плюсу питания через резистор подтяжки 4,7 кОм.

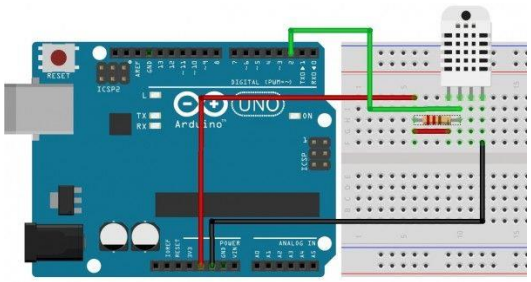


Рисунок 6 - Схема подключения сенсоров DHT к Arduino

Подключение датчика влажности почвы FC-28 (рис. 7). Аналоговый вывод датчика подключен к аналоговому входу Arduino, который представляет собой АЦП с разрешением 10 бит, что позволяет на выходе получать значения от 0 до 1023.

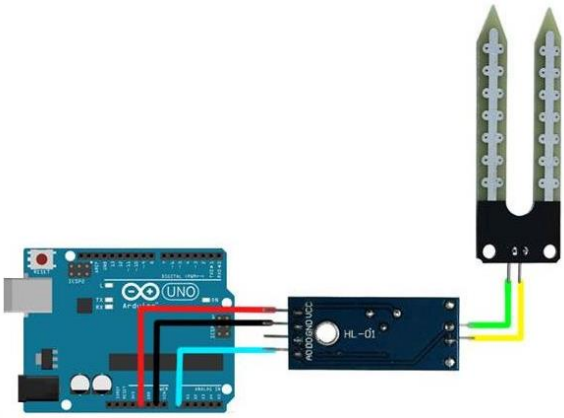


Рисунок 7 - Схема подключения сенсоров FC-28 к Arduino

Подключение фоторезистора. Мы строим обычный делитель напряжения, верхнее плечо которого будет меняться в зависимости от уровня света, падающего на фоторезистор. Снимаемое с нижнего плеча напряжение, мы подаем на аналоговый вход, который преобразует его в число от 0 до 1024.

В макете удобно реализовать выбранный регулятор с помощью драйвера L298N (рис. 8). Микроконтроллер подает управляющий сигнал на канал драйвера включения светодиодной ленты при уровне света ниже 100 люменов, на канал включения кулера при значении влажности помещения выше 60% и температуры 27 ºС.

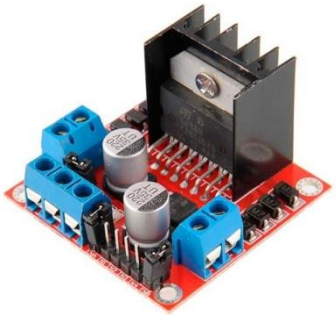


Рисунок 8 - Драйвер L298N

Драйвер моторов использует чип ST L298N, может напрямую управлять двумя двигателями от постоянного тока 3-30В, а также обеспечить интерфейс выхода 5В, питание 5В для однокристальных схем, поддержку управления 3.3В MCU. Можно легко управлять скоростью двигателя постоянного тока и направлением, а также контролировать 2-фазный шаговый двигатель.

Подключение модуля L298N (рис. 9). Данный модуль позволяет управлять одним или двумя двигателями постоянного тока [7]. В нашей схеме кулер и светодиодная лента. Для

начала, подключите двигатели к выводам A и B на контроллере L298N. Питание подается от блока питания RV-30-12.

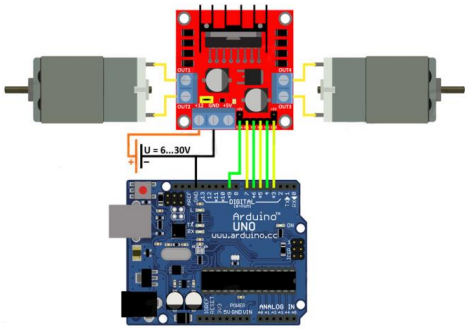


Рисунок 9 - Схема подключения модуля L298N к ARDUINO на примере двигателей постоянного тока

Рассмотренные подключения в данном разделе позволяют собрать рабочий макет, представленный на рис. 10,11, на примере которого продемонстрирована работа системы управления микроклиматом в цветочной оранжерее.

Рисунок 10 - Макет системы управления микроклиматом в цветочной оранжерее

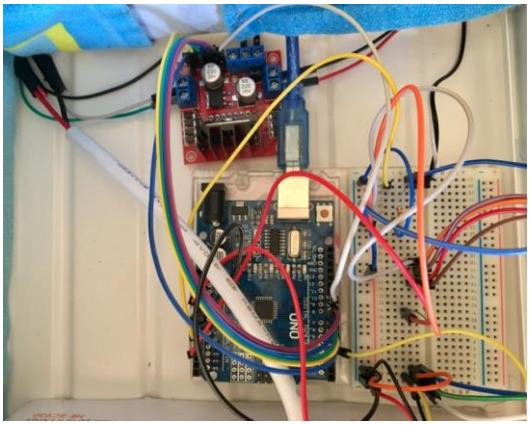


Рисунок 11 – Собранная схема системы управления микроклиматом

Разработка прикладного программного обеспечения

В начале работы необходимо разработать общий алгоритм программы, после чего написать подпрограммы для каждой задачи, согласно описанным выше алгоритмам.

Общий алгоритм заключается в том, что при запуске микроконтроллера на экран ПК выводятся данные с датчиков DHT11, FC-28 и фоторезистора. Пользователем в программе задается минимально допустимое значение света и максимально допустимое значение влажности и температуры в помещение.

Рассмотрим некоторые особенности управления устройствами ввода и вывода данных, датчиками и исполнительными механизмами при реализации программы.

Для инициализации датчиков DHT 11 в программе существует встроенная библиотека DHT.h, которую мы будем использовать, и которая содержит все необходимые функции.

```
#include "DHT.h"
```

Для идентификации определенного датчика используется функция #define.

```
#define DHTTYPE DHT11
```

После этого мы определяем, какие датчики подключаются к определенным выводам.

```
// вывод подключения входа данных модуля DHT11
 int pinDHT11=2;
//вывод подключения вентилятора
int enA = 10;
// подключение ленты
int enB = 5;
// вывод подключения аналогового выхода фоторезистора
 int pinPhotoresistor=A0;
// вывод подключения аналогового выхода модуля влажности почвы
int pinSoilMoisture=A2;
```

Вывод данных на монитор порта осуществляется следующим алгоритмом.

```
 // считываем влажность почвы
int output_value ;
output_value= analogRead(pinSoilMoisture);
output_value = map(output_value,550,0,0,100);
 delay(2000);
 int val =analogRead(pinPhotoresistor); // свет
 delay(2000);
//Считывание влажности помещения
float h = dht.readHumidity();
// Считывание температуры комнаты
float t = dht.readTemperature();
// Проверка считывания
if (isnan(h) || isnan(t)) {
Serial.println("Не удается считать показания");
return;
}
  Serial.print("Влажность: ");// влажность помещения
  Serial.print(h);
  Serial.print(" %\t");
  Serial.print("Температура: ");// температуры помещения
  Serial.print(t);
  Serial.println(" *C "); //Вывод показателей на экран
  Serial.print("Mositure : ");// почва
  Serial.print(output_value);
  Serial.println("%");
  Serial.print("Light= "); Serial.println(val);// свет
  Serial.println( );
```

Управление подключением кулера и светодиодной ленты осуществляется с помощью цикла с определенным условием, заданным заранее. В этом условии формируем сигнал ШИМ, который регулирует мощность кулера до 70% от первоначального значения. В условии включения светодиодной ленты формируем сигнал ШИМ с 80% от максимального значения.

```
if(h > maxh || t > maxt) {
  digitalWrite(in1, HIGH);
digitalWrite(in2, LOW);
for (int i=255; i>=180; --i)
{
 analogWrite(enA, i);
 delay(20);
}
} else {
  digitalWrite(in1,LOW);
  digitalWrite(in2, LOW);
    }
  //включение ленты
  if( val<minsv) {
digitalWrite(in3, HIGH);
digitalWrite(in4, LOW);
analogWrite(enB, 204);
  } else {
   digitalWrite(in3, LOW);
digitalWrite(in4, LOW);
```

После загрузки программы в микроконтроллер данные с датчиков будут выводиться на монитор портов вывода представленный на рис.12.

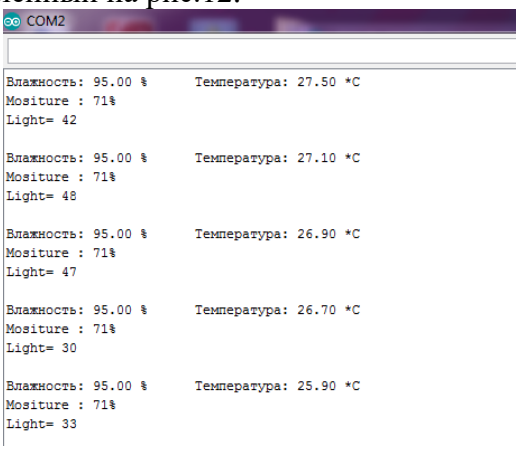


Рисунок 12 - Монитор портов вывода

Как показали результаты экспериментальных исследований на собранном макете, разработанная система управления микроклиматом в цветочной оранжерее соответствует поставленным требованиям.

Заключение

В данной работе рассмотрен процесс создания автоматизированной системы управления микроклиматом в цветочной оранжерее. Был рассмотрен подходящий регулятор для данной системы. Была выбрана элементная база, средства проектирования и отладки, написана программа управления системой. Создан макет системы управления микроклиматом в цветочной оранжерее на базе Arduino Uno.

Проведенные эксперименты с разработанным макетом позволяют утверждать, что данная система в полном объеме справляется с поставленной задачей, то есть поддерживает климатические условия для растений на заданном уровне.

Система состоит из легкодоступных на рынке компонентов и легка в эксплуатации, что позволяет создать коммерческий проект, который будет востребован на рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карташов, Б.А. Компьютерные технологии и микропроцессорные средства в автоматическом управлении/ Б.А. Карташов. – Ростов-н/Д: Феникс, 2013. –540с.
2. Рачков, М.Ю. Технические средства автоматизации / М.Ю. Рачков – М.: МГИУ, 2006. – 185 с.
3. Шалатонин И.А. Микроконтроллеры в системах управления и измерения: Методические указания к лабораторному практикуму, 2002. – 94 с.
4. Прокунцев, А. Ф. Преобразование и обработка информации с датчиков физических величин / А. Ф. Прокунцев, Р. М. Юмаев. - М. : Машиностроение, 1992. - 288 с.
5. Хартов В.Я. Микроконтроллеры AVR. Практикум для начинающих, 2007 – 240с.
6. Лашин В.А. Микроконтроллеры в системах управления. РГРТУ, 2010. – 30с.
7. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-393-400

Чернышев Александр Борисович, Половинко Екатерина Владимировна

Северо-Кавказский федеральный университет

УСТОЙЧИВОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИТСЕМ

Аннотация: *в статье разработана методика гармонической линеаризации класса нелинейных систем с распределенными параметрами. Получен общий вид эквивалентной передаточной функции линейного распределенного звена, обратная характеристика эквивалентной передаточной функции. Сформулирован алгоритм Гольдфарба, обобщенный для распределенных систем. Приведено графическое представление анализа автоколебаний для распределенных систем общего вида.*

Ключевые слова: *линеаризация, автоколебания, распределенные системы, нелинейная характеристика, передаточная функция.*

Abstract: *In the article developed the technique of harmonic linearization of a class of nonlinear systems with distributed parameters. General view of the received equivalent transfer function of linear distributed link. Received equivalent transfer function of linear distributed link, the reverse feature equivalent transfer function. Goldfarb a generalized algorithm is formulated for distributed systems. Shows a graphical representation of the self-oscillations analysis for distributed systems overall appearance.*

Keywords: *linearization, self-exciting oscillation, distributed systems, nonlinear characteristic, transfer function.*

К настоящему времени в области теории систем с распределенными параметрами получено достаточно много результатов, однако по большей части эти результаты направлены на исследование линейных систем. На практике большинство объектов, для которых строятся автоматические системы управления не являются линейными. Рассмотрим нелинейные системы, в которых возможно выделение нелинейной части в качестве отдельного звена, последовательно соединенного с линейным устойчивым звеном [1]. Автоколебательные системы успешно применяются для поддержания различных физических процессов, например, температуры, если амплитуда и частота колебаний находятся в допустимых пределах [2]. Одним из самых распространенных методов исследования автоколебаний является метод гармонической линеаризации. На сегодняшний день отсутствует четко разработанная теория исследования автоколебательных режимов систем с распределенными параметрами. Автоколебательный режим функционирования является в большинстве реальных процессов нежелательным режимом, но в некоторых случаях автоколебания являются основным рабочим режимом. Принципиальным отличием автоколебаний от колебательных процессов вообще для диссипативных систем, является то обстоятельство, что автоколебания осуществляются без колебательных внешних воздействий [3].

Для систем с сосредоточенными параметрами существует метод гармонической линеаризации. Можно выделить основные этапы применения этого метода:

– замена НЭ эквивалентной характеристикой – гармоническая линеаризация;
– определение параметров колебаний;
– исследование устойчивости колебаний;
– анализ чувствительности решения к высшим гармоникам и малым параметрам системы.

При решении задач анализа автоколебаний, т.е. определения наличия автоколебаний и при их наличии, нахождения частоты и амплитуды, соответствующих устойчивым автоколебаниям, удобно пользоваться графоаналитической схемой, предложенной Гольдфарбом (рис. 1).

– построить годограф комплексного коэффициента передачи линейной части системы $W(j\omega)$, при изменении частоты $\omega \in [0; +\infty]$;

– построить годограф обратной характеристики $M_H(a)=-\frac{1}{W_H(a)}$ комплексного коэффициента усиления нелинейного элемента, при изменении амплитуды $a \in [0; +\infty]$;

– найти точки пересечения годографов $W(j\omega)$ и $M_H(a)$. Решая уравнение гармонического баланса $W_H(a)\ W(j\omega) = -1$, найти значения частоты $\omega_П$ и амплитуды $a_П$ периодического движения;

– осуществлять движение по годографу $M_H(a)=-\frac{1}{W_H(a)}$ в направлении увеличения амплитуды от $a = 0$ до $a = +\infty$.

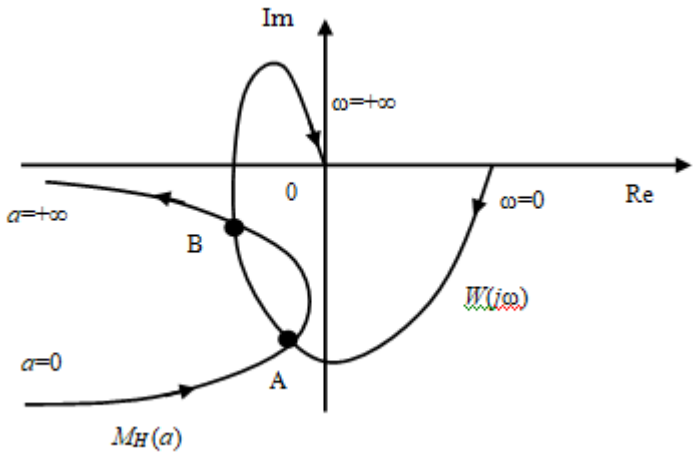


Рисунок 1 – Иллюстрация диаграммы Гольдфарба для сосредоточенных систем.

– Если, проходя точку пересечения годографов и продолжая двигаться по годографу $M_H(a)=-\frac{1}{W_H(a)}$ не встретится других точек пересечения, т.е. эта точка является последней точкой пересечения годографов (точка В на рисунке 1), то амплитуде $a_П$ будут соответствовать устойчивые автоколебания. Если же точка пересечения (точка А на рисунке 1) не является последней по ходу движения по годографу $M_H(a)$, то амплитуде $a_П$ будут соответствовать неустойчивые автоколебания.

Используя прием разложения функций, описывающих распределенные сигналы в ряды, согласно общей теории рядов Фурье, можно выделить класс распределенных систем, в которых допустимо разложение по собственным вектор-функциям оператора объекта [4,5]. Благодаря такой возможности, передаточная функция, описывающая объект с распределенными параметрами может быть представлена в виде некоторой совокупности передаточных функций по отдельным пространственным модам. Для учета пространственных координат вводится понятие «обобщенная координата».

В целях обобщения метода гармонической линеаризации для анализа систем управления с распределенными параметрами можно предположить выполнение следующих условий:

– структурная схема системы может быть представлена в виде последовательного соединения нелинейного элемента и линейной части;

– линейная часть системы должна быть представима в виде бесконечной совокупности независимых контуров.

Передаточная функция объекта по *n*-й моде входного воздействия может быть представлена в виде:

$$W_n(s) = \frac{\exp(\beta_n \cdot \bar{y}) + \exp(-\beta_n \cdot \bar{y})}{\exp(\beta_n \cdot l_y) + \exp(-\beta_n \cdot l_y)}$$

Используем структурное представление распределенных систем [6,7]. Для упрощения приводимых выкладок будем считать распределенный объект зависящим помимо времени только от одной пространственной координаты.

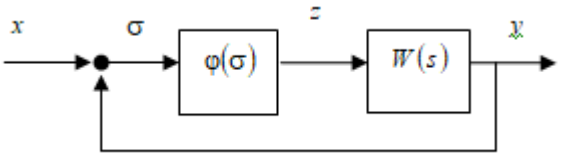


Рисунок 2 – Замкнутая система с одним нелинейным элементом

Пусть на вход нелинейного элемента (рис. 2) с характеристикой $z = \varphi(\sigma)$ подается гармонический сигнал

$$\sigma(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a \sin n\omega t \sin \frac{\pi n}{l} x$$

в виде разложения в ряд Фурье с амплитудой $a > 0$ и частотой $\omega > 0$. Разложим выходной сигнал нелинейного звена в ряд Фурье по времени:

$$z(x,t) = (q_0(a) + q(a)\, a \sin\omega t + q_1(a)\, a \cos\omega t + \dots) \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x,$$

где

$$q(a) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} \varphi(a \sin\eta) \sin\eta d\eta,\ q_1(a) = \frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} \varphi(a \sin\eta) \cos\eta d\eta.$$

В случае нечетности характеристики $z = \varphi(\sigma)$, постоянная составляющая сигнала $q_0(a)$ будет отсутствовать. Предположим, что устойчивая линейная часть системы обладает свойствами фильтра низких частот. Тогда, приближенное значение выходного сигнала нелинейного элемента, будет иметь вид:

$$z(x,t) = (q(a)\, a \sin\omega t + q_1(a)\, a \cos\omega t) \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x\ -$$

Пусть заданы изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях входного воздействия $\sigma(x,s)$ и функции выхода $z(x,t)$:

$$\sigma(x,s) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n(s) B_n(x)$$

где

$$B_n(x) = \sin \frac{\pi n}{l} x.\ C_n(s) = \frac{a\omega}{s^2 + \omega^2}$$

изображение по Лапласу функции $C_n(t) = a \sin\omega t$ при n=1, с учетом гипотезы фильтра. Тогда входное воздействие в виде изображения по Лапласу примет вид:

$$\sigma(x,s) = \frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x$$

Найдем изображение по Лапласу функции $z(x,t)$.

$$q(a)\ a\ \sin\omega t \rightarrow \frac{q(a)a\omega}{s^2+\omega^2},\ q_1(a)\ a\ \cos\omega t \rightarrow \frac{q_1(a)as}{s^2+\omega^2}.$$

Подставив полученные изображения в выражение функции $z(x,t)$ получим:

$$z(x,s) = \left(\frac{q(a)a\omega}{s^2+\omega^2}+\frac{q_1(a)as}{s^2+\omega^2}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\sin\frac{\pi n}{l},\ z(x,s) = \left(\frac{a(q(a)\omega+q_1(a)s)}{s^2+\omega^2}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\sin\frac{\pi n}{l}.$$

Передаточная функция распределенного звена определяется соотношением:

$$W(x,s)=\frac{z(x,s)}{\sigma(x,s)}, \qquad (1)$$

Подставив найденные выражения в (1), получим:

$$W(x,s)=\frac{\left(\frac{a(q(a)\omega+q_1(a)s)}{s^2+\omega^2}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\sin\frac{\pi n}{l}x}{\frac{a\omega}{s^2+\omega^2}\sum_{n=1}^{\infty}\sin\frac{\pi n}{l}x}$$

после простейших преобразований

$$W(x,s)=W(a,s)=\frac{a(q(a)\omega+q_1(a)s)}{s^2+\omega^2}\cdot\frac{s^2+\omega^2}{a\omega},\ W(a,s)=\frac{q(a)\omega+q_1(a)s}{\omega},$$

получим:

$$W(a,s)=q(a)+\frac{q_1(a)}{\omega}s \qquad (2)$$

Если подать гармонический сигнал

$$\sigma(x,t)=\sum_{n=1}^{\infty}a\sin\omega t\sin\frac{\pi n}{l}x$$

на вход линейного звена с передаточной функцией (1), получим выходной сигнал

$$z(x,t) = (q(a)\ a\ \sin\omega t + q_1(a)\ a\ \cos\omega t)\sum_{n=1}^{\infty}\sin\frac{\pi n}{l}x,$$

полностью совпадающий с приближенным выходным сигналом нелинейного элемента. Таким образом, нелинейное звено может быть заменено на эквивалентное линейное с передаточной функцией (2). Для получения частотной характеристики этого звена в (2) положим $s = j\omega$, получим:

$$W_H(a,\ j\omega)=q(a)+\frac{q_1(a)}{\omega}\ j\omega,\ W_H(a)=q(a)+jq_1(a).$$

$W_H(a)$ – комплексный коэффициент усиления нелинейного элемента, зависит только от амплитуды входного сигнала. Передаточная функция распределенного звена может быть представлена в виде соотношения:

$$W(x,s)=E\left[\frac{n_1-1}{n_1}-\frac{1}{n_1}\Delta^2\right]$$

где $\Delta^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}$ – лапласиан; n_1- весовой коэффициент $(n_1\geq 1)$.

Пусть заданы изображения по Лапласу при нулевых начальных условиях входного воздействия:

$$\sigma(x,s)=\frac{a\omega}{s^2+\omega^2}\sum_{n=1}^{\infty}\sin\frac{\pi n}{l}x$$

и функции выхода:

$$z(x,s) = \left(\frac{a(q(a)\omega + q_1(a)s)}{s^2 + \omega^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x ,$$

которые связаны соотношением:

$$z(x,s) = E\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} \sigma(x,s) - \frac{1}{n_1} \Delta^2 \sigma(x,s) \right]$$

Подставим значения σ(*x*,*s*) и используем оператор дифференцирования:

$$z(x,s) = E\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} \frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x - \frac{1}{n_1} \frac{\partial^2}{x^2} \left(\frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x \right) \right],$$

$$z(x,s) = E\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} \frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x + \frac{1}{n_1} \left(\frac{\pi n}{l} \right)^2 \left(\frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{l} x \right) \right].$$

Обозначив $\psi = \frac{\pi n}{l}$, и производя преобразования, получим выражение функции выхода:

$$z(x,s) = E \frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \psi x \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \psi^2 \right]$$

Используя выражение входного воздействия

$$\sigma(x,s) = \frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \psi x$$

Получим передаточную функцию распределенного звена:

$$W(x,s) = \frac{E \frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \psi x \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \psi^2 \right]}{\frac{a\omega}{s^2 + \omega^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \psi x}$$

$$W(x,s) = E\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \psi^2 \right] \qquad (3)$$

Введем дискретную функцию:

$$\tilde{G}(n) = \psi^2 , \ \tilde{G}(n) = \left(\frac{\pi n}{l} \right)^2 .$$

Выражение (3) может быть записано в виде:

$$W(G) = E\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right], \ 0 \le G \le \infty .$$

Передаточную функцию эквивалентного линейного распределенного элемента представим в виде:

$$W_H(a,G) = W_H(a) W(G) .$$

Или:

$$W_H(a,G) = E\left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] \left(q(a) + j q_1(a) \right)$$

На рисунке 3 показана эквивалентная распределенная система.

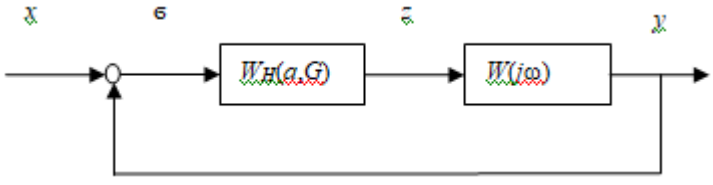


Рисунок 3 – Эквивалентная распределенная система.

Весовой коэффициент n_1 показывает степень влияния на передаточную функцию пространственных координат. Пусть общий коэффициент усиления E =1. При $n_1 \to \infty$, получим: $W_H(a,G) = q(a) + jq_1(a)$. Передаточная функция эквивалентного звена не зависит от пространственных координат и, следовательно, нелинейный элемент в исходной системе зависит только от времени. При n_1=1:

$$W_H(a,G) = G(q(a) + jq_1(a)).$$

При n_1=10:

$$W_H(a,G) = 0,9(q(a) + jq_1(a)) + 0,1G(q(a) + jq_1(a)).$$

Передаточная функция эквивалентного звена зависит от пространственных координат.

Запишем для полученной передаточной функции эквивалентного линейного звена и передаточной функции линейной части распределенной системы (рис. 3) уравнение гармонического баланса:

$$W_H(a,G)W(j\omega) = -1.$$

Обратная характеристика эквивалентного звена будет иметь вид:

$$M_H(a,G) = -\frac{1}{W_H(a,G)},$$

или

$$M_H(a,G) = -\frac{1}{E\left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1}G\right](q(a) + jq_1(a))}.$$

Таким образом, анализ автоколебаний распределенной системы сводится к решению следующей задачи. Предположим, что структурная схема нелинейной распределенной системы представлена в виде последовательного соединения нелинейного звена и линейной части, при этом известны:

– характеристика нелинейного элемента φ(σ);

– передаточная функция линейной части системы $W(s)$.

Необходимо определить:

– возможны ли в системе автоколебания?

– если автоколебания возможны, то определить их параметры, т.е. амплитуду и частоту предельного цикла.

Для систем с распределенными параметрами будем рассматривать возможность автоколебаний каждого отдельного условно-сосредоточенного контура [8,9].

Сформулируем алгоритм Гольдфарба, обобщенный для распределенных систем:

– построить годограф комплексной передаточной функции линейной части системы, при изменении частоты 0≤ω<∞, для каждого независимого контура, т.е. передаточной функции вида:

$$W_n(s) = \frac{\exp(\beta_n \cdot \bar{y}) + \exp(-\beta_n \cdot \bar{y})}{\exp(\beta_n \cdot l_y) + \exp(-\beta_n \cdot l_y)},\ \beta_n = \left(\frac{s}{a} + \psi_n^2\right)^{\frac{1}{2}},\ s = j\omega,\ \psi_n = \frac{\pi n}{l_x},\ (n = \overline{1,\infty}).$$

– построить годограф обратной характеристики эквивалентного распределенного линейного звена, заменяющего нелинейный элемент, при изменении амплитуды 0<a<∞.

$$M_H(a,G) = -\frac{1}{E\left[\frac{n_1-1}{n_1} + \frac{1}{n_1}G\right](q(a) + jq_1(a))},\ G = \psi_n^2 = \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2.$$

– найти значение частоты $\omega_П$ и амплитуды $a_П$ периодического движения, соответствующие точкам пересечения годографов $W(j\omega)$ и $W_H(a,G)$, решив уравнение гармонического баланса:

$$W_H(a,G)W(j\omega) = -1.$$

Графическая интерпретация метода Гольдфарба (рис. 4):

Если при движении по годографу

$$M_H(a,G) = -\frac{1}{W_H(a,G)}$$

при увеличении амплитуды a от значения $a_П$ оказываемся в точке, которая не охватывается годографом $W(j\omega)$, то амплитуде $a_П$ соответствуют устойчивые колебания, если оказываемся в точке, которая охватывается годографом $W(j\omega)$, то амплитуде $a_П$ соответствуют неустойчивые колебания.

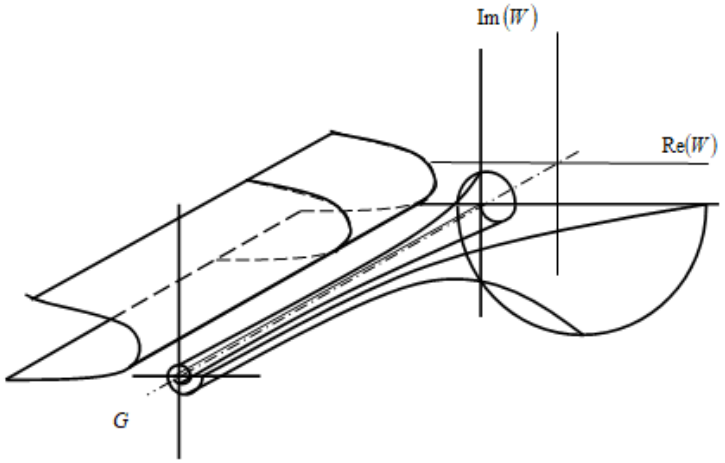


Рисунок 4 – Графическое представление анализа автоколебаний распределенных систем.

В заключение следует отметить, что метод гармонической линеаризации – это приближенный метод. Если решение уравнения гармонического баланса отсутствует, то это означает, что данным методом не удается выявить периодических движений системы. Если же удается найти частоту автоколебаний, необходимо проверить выполнение гипотезы фильтра низких частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А.Б., Кравцова А.Л., Соха Е.Ю. Анализ устойчивости процесса стабилизации температурного поля нелинейной распределенной системы. // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 9. – С. 16-21.

2. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний 2-е изд., перераб. и испр. – М.: Наука, 1981. – 918 с.

3. Ланда П.С. Автоколебания в распределенных системах 2-е издание. – М.: Либроком, 2010. – 320 с.

4. Ляшенко А.Л. Решение задач моделирования. – Пятигорск: ПГТУ, 2005. – 103 с.

5. Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Ильюшин Ю.В. Моделирование релейно-импульсных распределенных систем. – Пятигорск: изд-во ПГГТУ, 2012. – 248 с.

6. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.

7. Чернышев А.Б., Могилевская Е.В., Гайворонская Н.А. Анализ распределенных объектов, заданных в структурном представлении. // Научное обозрение. – 2014. – № 5. – С. 180-184.

8. Чернышев А.Б. Обобщение методов анализа устойчивости для распределенных систем. // Современная наука и инновации. – 2015.- № 3 (11). – С. 16-22.

9. Martirosyan A.A., Martirosyan K.V., Chernyshev A.B. Methods of distributed systems' structured modelling. //В сборнике: Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW. – 2016. – С. 283-289.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-401-408

Санкин Александр Викторович (1), Алтухов Виктор Иванович (1), Сигов Александр Сергеевич (2)

1. Северо-Кавказский федеральный университет
2. МИРЭА-Российский технологический университет

ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР И РАСЧЕТ ВЫСОТЫ БАРЬЕРА ДИОДОВ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ 4H-SIC И ЕГО ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

Аннотация. *В работе рассмотрены методы получения и управление процессами роста монокристаллов карбида кремния (4H-SiC) и пленок твердых растворов SiC с барьером Шоттки. Представлен метод индукционного нагрева для получения монокристаллов SiC при температурах от 2000 до 2500^{0}C. На базе натурной модели этого метода предложена запатентованная установка для получения совершенных монокристаллов SiC [1]. Рассмотрены способы получения тонких пленок и диодов с барьером Шоттки на основе твердых растворов SiC.*

Ключевые слова: *монокристаллы карбида кремния, получение тонких пленок, высота барьера Шоттки, диоды на основе SiC, управление процессом сублимации.*

Abstract. *The paper considers methods for obtaining and managing the growth of single crystals of silicon carbide (4N-SiC) and films solid solutions SiC Schottky barrier. Submitted by induction heating method for obtaining SiC single crystals at temperatures from 2000 to 2500 ^{0}C . Field-based models of the proposed method patented installation to obtain perfect monocrystals SiC [1]. Learn how to obtain thin films and Schottky barrier diodes with solid solutions based on SiC.*

Keywords: *Silicon Carbide single crystals, obtaining thin films, barrier height Schottky diodes based on SiC, managing the process of sublimation.*

Описание объекта.

Выращивание монокристаллов карбида кремния для полупроводникового производства представляет собой достаточно сложную техническую задачу [1,2]. Главной проблемой при получении кристаллов SiC является отсутствие у него жидкой фазы при реально технически достижимых давлениях, а также высокие температуры синтеза. Наиболее распространённым методом выращивания полупроводниковых монокристаллов карбида кремния является метод сублимации, т.е. испарения и конденсации. Этот метод применяется как для получения абразивного материала, так и для выращивания монокристаллов, предназначенных для полупроводниковой электроники. Идея метода [1] основана на переносе материала источника (шихты) при температурах более 2000° С к затравке, находящейся при более низкой температуре. Сублимационный рост происходит в диапазоне температур от 1800 до 2600°С. Однако, развитие тонкоплёночных технологий, в том числе на основе SiC, привело к прогрессу в микро- и оптоэлектронике. При выращивании плёнок со сложным составом и структурой приходится, в отсутствии общепризнанных теоретических моделей, экспериментально подбирать как материал и структуру подложек, так и технологические параметры процесса эпитаксии.

С целью более подробного изучения процессов сублимации в настоящей работе предложена натурная модель индукционного нагрева для получения монокристаллов карбида кремния и тонких пленок на основе его твердых растворов.

1. Модель камеры индукционного нагрева для выращивания совершенных монокристаллов SiC

В работах [2,3] были получены уравнения для моделирования процессов роста и распределения температурных полей в ростовой камере. Описана реализованная установка с индукционным нагревом для выращивания монокристаллов карбида кремния (рисунок 1).

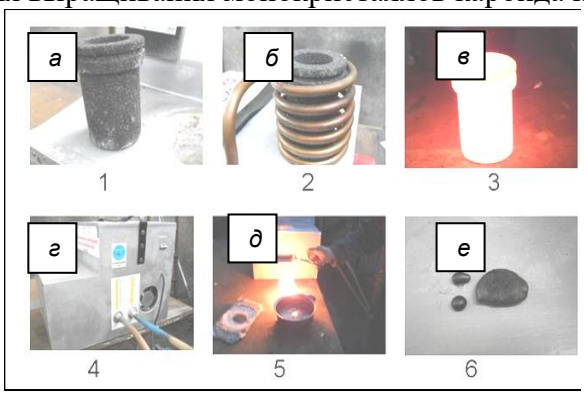


Рисунок 1. Устройство для получения монокристаллов из тугоплавких материалов: графитовый тигель (а), индукционная катушка (б), тигель с расплавом (в), общий вид установки (г), извлечение расплава (д), охлажденный расплав (е).

Установка содержит графитовый тигель, индукционную катушку, систему водяного охлаждения. Для испытаний установки использовались тугоплавкие заготовки. Полученный расплав в объеме от 10 до 20 $см^3$ разливался при температуре порядка 2000°С в ранее заготовленные формы. В процессе индукционного нагрева ферромагнитные свойства системы изменяются. В частности постоянно меняется дополнительная индуктивность, внесенная в индукционную катушку нагреваемым металлом. Для управления процессом нагрева и сохранения максимального КПД всей системы в ходе нагрева, необходимо постоянно изменять частоту генератора с целью поддержания рабочей резонансной частоты контура. При этом применяются современные мощные IGBT транзисторы. Современные транзисторные ТВЧ генераторы способны отслеживать и изменять выходную частоту в большом диапазоне. Настоящая модель была реализована и апробирована с использованием тугоплавких материалов.

В работе также предлагается новое техническое решение, позволяющее реализовать получение монокристаллов 4H-SiC методом управляемого высокотемпературного индукционного нагрева. Предлагаемое устройство содержит новые существенные положения [5] (см. рисунок 1):

– введение дополнительных колебательных контуров для управления процессом сублимации;

– 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 подстроечных конденсаторов, обеспечивающих резонансный режим с индуктором (3) – основным колебательным контуром. Стабильность режима сублимации поддерживается путем изменения электрических и пространственных параметров дополнительных управляемых колебательных контуров.

Конструкция предложенной установки для получения монокристаллов SiC методом сублимации [1] представлена на рисунке 1. В данной технологии стабильные значения градиентов температур ($1 \div 4°С/10^{-3}$м) обеспечиваются с высокой точностью предварительными

измерениями текущих температур, с накоплением их значений в базе данных с последующей статистической обработкой для обеспечения оптимального режима сублимации.

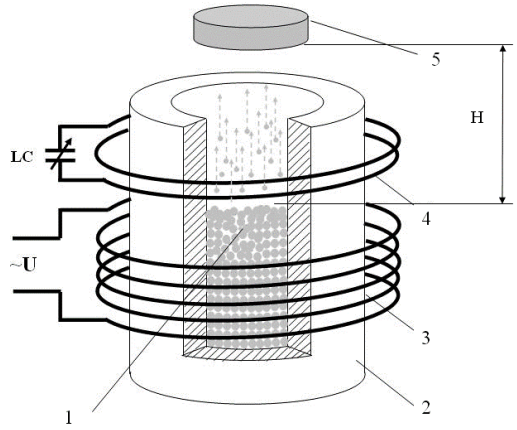


Рисунок 2. «Получение монокристаллов, пленок карбида кремния.

Настоящая установка с управляемым индукционным нагревом для выращивания совершенных кристаллов позволила получить опытные образцы керамики, пленки карбида кремния и диоды на основе SiC [8,9].

2. Получение тонких пленок SiC и твердых растворов на его основе [3].

Получение тонких пленок карбида кремния из широкозонных полупроводниковых материалов может производиться разными методами [4-6]. Одним из распространенных методов получения тонких пленок SiC является технология химического осаждения смесей силана и углеводородов, кремнийорганических соединений из газовой фазы в потоке водорода [4,7].

Данная технология позволяет получать эпитаксиальные слои SiC высокого качества. Однако, недостаток этого метода – необходимость высокой температуры процесса эпитаксии. Поэтому, проведенные в [4] исследования низкотемпературного синтеза тонких пленок SiC методом вакуумной лазерной абляции и анализ влияния температуры подложки на структуру и морфорлогию поверхности пленки, позволили получить тонкие пленки SiC на однородном монокристалле кремния посредством лазерного испарения в вакууме для порошковой мишени [5].

Для получения твердых растворов$(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ важное значение приобретают параметры процесса кинетики распыления многокомпонентной прессованной мишени магнетронным распылением. Для этого в [6,7] проведены исследования в рамках кластерной модели распыления мишени по зависимости скорости и коэффициента распыления от плотности ионного потока, энергии ионов и размеров кластера. В итоге достигнута хорошая корреляция расчетов и данных экспериментов.

3. Технология получения структур SiC-AlN и AlGaN/GaN

Значительный интерес для производства СВЧ полупроводниковых устройств на основе широкозонных гетеросистем $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ [7]. Большие ширины запрещенных зон и величина напряжение пробоя $U_{пр}$>100 В при высокой плотности электронов делают эти гетеросистемы весьма перспективной для СВЧ приборов повышенной мощности. В работах [8,9] приведены технологии изготовления AlGaN/GaN с использованием ионно-лучевого травления для получения глубины изоляции до 100нм. Приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторных структур. Показано, что при облучении реакторными нейтронами с энергией до 4 МэВ ток стока и выходная мощность транзистора падают на 10%. Получено, что рабочая частота усиления по току и мощности снижаются на 20-25%.

4. Модели осаждения тонких пленок и структур на основе SiC и AlN

В настоящее время процессы роста тонких пленок широкозонных материалов крайне мало изучены. Здесь мы кратко рассмотрим две новые модели осаждения тонких пленок.

4.1 Осаждение пленок SiC-AlN на мишень с площадью S [3,4]. Поверхностно-барьерные структуры на пленках твердого раствора $(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ n-типа проводимости получаются на подложках 6H-SiC методом высокочастотного (13,56 МГц) магнетронного распыления составных мишеней. Значения коэффициентов распыления оцениваются по изменению веса мишени после распыления:

$$S = \frac{26,6}{AI_m t} \qquad (1)$$

где m – изменение массы мишени (мгк), I_m – ток на мишени (мкА), t – время распыления (ч), A – массовое число атома мишени.

Пороговая энергия отрыва атома от поверхности определяется по энергии сублимации вещества. В итоге определяются скорости распыления мишеней из SiC и AlN для получения пленок заданного состава.

4.2 Квантовостатистическая модель образования пленок [11]. В квантовостатистической модели роста пленок на кристаллических подложках скорость роста определяется из интегрального уравнения для щели (Δ) – среднего поля конденсата:

$$\Delta = -\sum V(kk)\frac{\Delta}{\sqrt{\varepsilon^2 + |\Delta|^2}} th\frac{\sqrt{\varepsilon^2 + |\Delta|^2}}{2\Theta} \qquad (2)$$

Здесь $V(kk)$ – Фурье-образ потенциальной энергии взаимодействия пары частиц, ε – перенормированная энергия возбуждений системы, $\Theta = k_Б T$, $k_Б$ – постоянная Больцмана.

Численное решение уравнения (2) относительно Δ позволяет найти скорость и другие параметры роста пленок.

4.3 Модифицированная модель барьера Шоттки. Рассмотрим модель барьера Шоттки с локализованными в области контакта состояниями дефектов [20], но в более высоком (нелинейном) по концентрации дефектов (N_i=c·10^{13}см$^{-2}$·эВ$^{-1}$; c=0-30, где параметр c – «концентрация» в единицах 10^{13}см$^{-2}$·эВ$^{-1}$). В этом подходе, наряду с концентрацией дефектов N_i, вводятся числа заполнения $n_x(c)$, определяемые видом гамильтониана системы (в нашем случае это гамильтониан Андерсена). Такой подход дает более высокие значения барьера Шоттки и при малых N_i (N_i<10^{13}см$^{-2}$·эВ$^{-1}$ [17,18]) ведет к лучшему, чем классическая формула Бардина, Шоттки-Мотта, согласию с данными опытов. В этой модели высота барьера Φ_B^x определяется формулой [15, 18]:

$$\Phi_B^x(c) = \Phi_m - \chi + \Delta\Phi_x(c)$$
$$\Delta\Phi_x(c) = 4\pi\left(e^2 / 4\pi\varepsilon_0\varepsilon\right)\lambda N_i n_x(c) \qquad (3)$$

Здесь Φ_m – работа выхода из металла, χ – электронное сродство, $\Delta\Phi_x(c)$ – потенциальный барьер на контакте за счет туннелирования электронов между металлом и локализованными квазиуровнями (состояниями E_i), λ – толщина двойного слоя с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_0\varepsilon$, N_i – плотность изолированных состояний дефекта, $n_x(c)$ – число заполнения локализованного квазиуровня E_i с полушириной $\Gamma=\pi\rho U^2$ (U – энергия гибридизации металлических и локализованных состояний), ρ – постоянная, по предположению, плотность состояний металла, E_F – уровень (энергия) Ферми.

Тогда полупроводник, находящийся в контакте с металлом, характеризуется поверхностными дефектными состояниями $|d>$, энергии которых E_i лежат в запрещенной зоне. Взаимодействие уровня $|d>$ с металлом при этом может быть описано гамильтонианом Андерсена [19].

Тогда для высоты потенциального барьера Шоттки Φ_B^x и чисел заполнения $n_x(c)$ по (3) и (5) получаем [10,13]:

$$\Phi_B^x(c) = p + k\eta c 2n_x(c)$$

$$\Gamma\delta_x(c) = p - (1-\xi_i)E_g^x + k\eta c(1-cv) \quad (4)$$

$$n_x(c)=(1/\pi)\cdot arccot\delta_x(c). \quad (5)$$

Здесь k=0,272 эВ, $p=\Phi_m-\chi$; энергия поверхностных состояний $E_i=E_g\xi_i$, ξ_i = 0.3 (0.5; 0.7); ширина барьера λ=3ηÅ, η=0.5–2.0; в приближении c^2 при $2n_{x0}\approx 1-cv$, получаем (5), где v – коэффициент разложения, принимающий значения от 0 до 1/30.

Результаты расчётов по (4), (5) высоты барьера Шоттки как функции параметров нелинейной модели (БШН) ξ_i, x и c [18] представлены на рисунках 2 и 3. При v=0 формулы (4)-(5) дают результаты, близкие по значениям к линейной относительно c модели (БШН) [15], а при $c(1-cv)=0$ в (5) модель БШН совпадает с моделью БШ. На рисунке 3 представлены результаты анализа зависимости значений барьера Шоттки Φ_B^x и n_x от концентрации дефектов c (БШН), для значения $E_i\approx 0.5E_g^x$ [15], при составах x= 0.2; 0.5; 0.7. На рисунке 3(а,б) представлены зависимости высоты барьеров Шоттки как функция состава x.

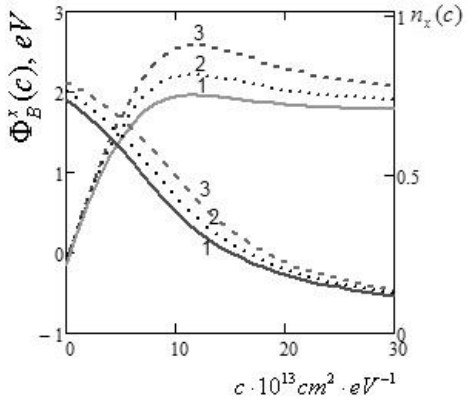


Рисунок 3. (а) – Барьер Шоттки и числа заполнения как функции концентрации дефектов БШН для системы N-Al/P-(SiC)1-x(AlN)x и для значения энергии дефектов Ei≈0.5EGX, при X= 0.2; 0.5; 0.7 для кривых 1, 2 и 3 соответственно.

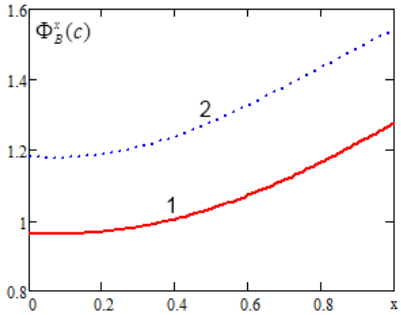


Рисунок 3.(б) – Высота барьера Шоттки (БШН) как функция состава x для N-AL/P-(SIC)1-X(AlN)X ПРИ C=4; E1=0.3EG (кривая 1) И E2=0.5EG (кривая 2).

4.4 Данные значений барьеров Шоттки в диодах на основе пленок твердых растворов SiC. В работе [10] авторами по значениям фототока полученных структур $Me/(SiC)_{0.4}(AlN)_{0.6}$ была определена высота барьеров Шоттки для металлов (Me) Al, Ti, Cr, Ni: 1,78; 1,85; 1,98; 2,16 эВ, которые согласуются с данными расчетов по модифицированной модели барьера Шоттки Φ^X_B(C): 1,74; 1,90; 1,78; 2,24 эВ [10,13,14] при концентрациях $Ni= 6\cdot 10^{13}$cm$^{-2}\cdot eV^{-1}$ (c=6). Значения для Cr выпадают из общего ряда по причине характерной исходной величины для его работы выхода. Полученные значения хорошо согласуются с результатами опытов.

5. ВАХ диодов на основе карбида кремния

В гетеропереходах типа n-SiC/p-$(SiC)_{1-x}(AlN)_x$ на границе перехода в области с высокой плотностью состояний носителей заряда, появляется резонансный квазиуровень E_F. При этом носители тока проникают через барьер эффективно, как в металл и токопрохождение через Φ_g^x будет носить характер термоэлектронной (te), полевой (p) или термополевой (tp) эмиссии в зависимости от напряжения U. Этим, как было отмечено, объясняется качественное сходство ВАХ диодов с барьером Шоттки и обычных *p-n* переходов [16]. В таких случаях для описания ВАХ диодов на основе SiC в широкой области напряжений ($0<U<5\div15B$) нами предложено использовать составную-аддитивную по токам модель. В этой модели в области низких напряжений ($0<U<0.5B$) составляющая тока определяется термоэлектронной эмиссией. Составляющая полевой эмиссии, проявляется в области напряжений $0.5<U<2.5B$. Термополевая эмиссия наблюдается в области напряжений $2.5<U<5B$ [7,16].

В области низких напряжений ($0<U<0.5B$) составляющая тока термоэлектронной эмиссии будет иметь вид [16]:

$$I_{te}(U,x)=I_{ss}^x\left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right)-1\right],$$

$$I_{ss}^x=sA^*T_i^2\exp\left(-\frac{\Phi_B^x(c)}{mkT}\right), \qquad (3)$$

где I_{ss}^x – ток насыщения, s – площадь контакта (порядка 2÷5 мм^2), x – состав, A^* – постоянная Ричардсона, равная $120\left(m_e^*/m_e\right)$ $A/см^2\cdot K^2$; q – электронный заряд, n и m – факторы идеальности.

Составляющую полевой эмиссии с учетом опытных данных [7], проявляющуюся в области напряжений $0.5<U<2.5B$, можно представить в виде:

$$I_p(U,x)=I_p^x\exp\left(\frac{qU}{n_1E_{00}^x}\right),$$

$$I_p^x=sA_i^{**}T_i^2\exp\left(-\frac{\Phi_B^x(c)}{E_{00}^*}\right). \qquad (4)$$

Здесь n_1 - фактор идеальности для $I_p(U,x)$; A_i^{**} – коэффициент, связанный с постоянной Ричардсона A^*, сложно зависящий от соответствующего исходного материала [16]; $E_{00}^*=m_1^iE_{00}$ ($E_{00}\approx20\,мэВ$) – фактор m_1^i и характеристическая энергия заданного материала, которые можно определить по данным опытов.

Для термополевой эмиссии в области $2.5<U<5B$ напряжений согласно [16] получаем:

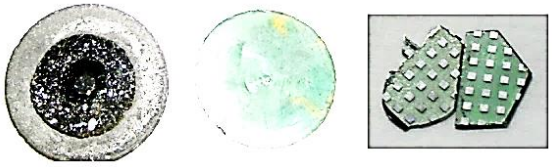
$$I_{tp}(U,x)=I_{tp}^x\exp\left(\frac{qU}{n_2E_0^x}\right),$$

$$I_{tp}^x=sB_iT_i^2\exp\left(-\frac{\Phi_B^x(c)}{E_0^*}\right), \qquad (5)$$

где n_2 и m_2^i – фактор идеальности для $I_{tp}(U,x)$; $E_0^*=m_2^iE_0$, $E_0=E_{00}cth\left(E_{00}/kT\right)$; c – концентрация поверхностных дефектов; $i=1,2,3,4$ и E_0 – характеристическая энергия материала. Зависимость T_i^2 в (16) определена исходя из данных опытов [7].

Заключение

1. Разработана и апробирована установка для получения монокристаллов из тугоплавких материалов. Разработанная установка с управляемым индукционным нагревом для выращивания совершенных кристаллов позволяет получить следующие типы образцов и простейших изделий [4,5] (рисунок 4).



а) б) в)

Рисунок 4 – опытные образцы и примеры изделий: керамика (а), карбид кремния (б) изделия на основе sic -диоды (в).

2. Приведены сведения и данные о способах получения пленок SiC и его твердых растворов.

3. Рассчитаны значения барьеров Шоттки в диодах на основе пленок твердых растворов SiC, которые согласуются с данными опытов. Рассчитанные значения барьеров Шоттки в диодах на основе пленок твердых растворов SiC представленные в таблице 1, согласуются с данными опытов.

Таблица 1 Сравнение данных опытов с расчетными значениями барьеров Шоттки

Металл	***Al***	***Ti***	***Cr***	***Ni***
Опытные данные, эВ	1,78	1,85	1,98	2,16
Результаты расчета, эВ	1,74	1,90	1,78	2,24

4. Развита составная (аддитивная) модель полного эмиссионного тока для описания вольт-амперных характеристик диодов и гетеропереходов. Предложены модели процессов образования тонких пленок на основе карбида кремния, необходимых при разработке гетероструктур и диодов.

Разработка и изготовление диодов, светодиодов, транзисторов, микросхем и спецприборов на основе структур и пленок карбида кремния являются необходимой составляющей создания элементной базы силовой экстремальной микроэлектроники нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.В. Санкин, В.И. Алтухов, Б.А. Казаров, И.С. Касьяненко, Л.М. Осмоловский. Устройство для получения совершенных монокристаллов карбида кремния с дополнительными регулирующими контурами индукционного нагрева. Патент на полезную модель №173041. Начало срока действия патента 20.02.2017г.

2. O.Klein, P.Philip. Transient numerical investigation of induction heating during sublimation growth of silicon carbide single crystals. Journal of Crystal Growth, vol.247, 2003, p.p. 219-235.

3. US Patent №6428621. Metod for growing low defect density siliconcarbide published, 2002.

4. Гусев А.С., Рындя С.М., Каргин Н.И., Бондаренко Е.А. Низкотемпературный синтез тонких пленок карбида кремния методом вакуумной лазерной абляции и исследование их свойств. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, №5, 2010, с.18-22.

5. Гусев А.С., Михнев Л.В., Рындя С.М., Бондаренко Е.А. Заявка 2007112699/02 РФ. Способ получения тонких пленок карбида кремния методом вакуумной лазерной абляции. ООО «УФ-техника».

6. Каргин Н.И., Сафаралиев Г.К., Харламов Н.А., Кузнецов Г.Д., Рындя С.М. Кинетические особенности получения пленок твердого раствора (SiC)1-x(AlN)x ионным распылением. Известия вузов. Северо-кавказский регион. Технические науки, №6, 2013, с.118-121.

7. Сафаралиев Г.К. Твердые растворы на основе карбида кремния.М.: Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2011, 296 с.

8. Каргин Н.И., Громов Д.В., Кузнецов Г.Д., Грехов М.М.. Влияние облучения на приборные характеристики транзисторных структур на основе AlGaN/ GaN.

9. Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2014, Т. 3, №1, с.68-70.

10. Takashi I., Tatsuo N., Ando Y. et al. Polarization engineering on buffer layer in GaN – based heherojunction FET “s, IEEE Transaction on Electron Devices, vol.55, Issue 2, 2008, pp.483-488.

11. Алтухов В.И., Касьяненко И.С., Санкин А.В., Билалов Б.А., Сигов А.С..

12. Расчет Барьера Шоттки и вольт-амперных характеристик структур металл-твердые растворы на основе карбида кремния, ФТП, Т. 50, В. 9, 2015, с. 1190-1194

13. В.И. Лебедев. Физика фазовых переходов в дефектных и малоразмерных кристаллов. Монография, Ставрополь: СевКавГТУ 2008, 227 с.

14. Best Reported WBG Power Device Perfomance/Purdue University WBG Research Group, June, 2004.

15. Алтухов В.И., Санкин А.В., Сигов А.С., Сысоев Д.К., Янукян Э.Г.,

16. Филиппова С.В. Нелинейная по концентрации поверхностных состояний модель барьера шоттки и расчет вольт-амперных характеристик диодов на основе SiC и его твердых растворов в составной модели токопереноса, ФТП, Т. 52, В. 3, 2018, с. 366-369.

17. Agarwall A., Capell C., Phan B., Milligan J., Palmour J.W., Stambaugh J., Bartlow H., Brewer K. “Power amplification in UHF band using SiC RF power BJTs”, Mater.Sci.Forum, vols. 433-436, 2003, pp. 785-788.

18. Lendenmann H., Bergman J.P., Dahlquist F., Hallin H.. High power SiC diodes-characteristics, reliabil-ity and relation to material defects, Mater. Sci. Forum, vols. 433-436, 2003, p.p.901-905.

19. Лебедев А.И.. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Физматлит, 2008, 488 с.

20. 20.Сафаралиев Г.К. Твердые растворы на основе карбида кремния. – М.: Физматлит, 2011, 296 с.

21. Сафаралиев Г.К., Билалов Б.А., Курбанов М.К., Алтухов В.И., Касьяненко И.С., Санкин А.В. Расчет высоты барьера Шоттки на контакте металла с полупроводниковым твердым раствором (SiC)1–x(AlN)x. Микроэлектроника, Т. 44, № 6, 2015, с.453–458.

22. Курбанов М.К., Билалов Б.А., Сафаралиев Г.К., Рамазанов Ш.М. Влияние условий роста на свойства твердых растворов (SiC)1–x(AlN)x при сублимационной эпитаксии. Известия вузов. Неорганические материалы, Т. 43, № 12, 2007, с.1–3.

23. Исмаилова Н.П., Н.В. Офицерова, Г.К Сафаралиев. Моделирование электрофизических свойств гетероструктур n-SiC/p-(SiC)1-X(AlN)X.// Мониторинг. Наука и Технологии. №1, 2009, с.117-124.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-409-416

Абрамкин Сергей Евгеньевич (1), Душин Сергей Евгеньевич (1),
Першин Иван Митрофанович (2), Сирота Даниил Дмитриевич (1)

1. Санкт–Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
2. Северо-Кавказский федеральный университет

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОЙ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА С УЧЕТОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СКВАЖИН

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

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

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

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

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

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

Непрерывные математические модели фильтрации

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

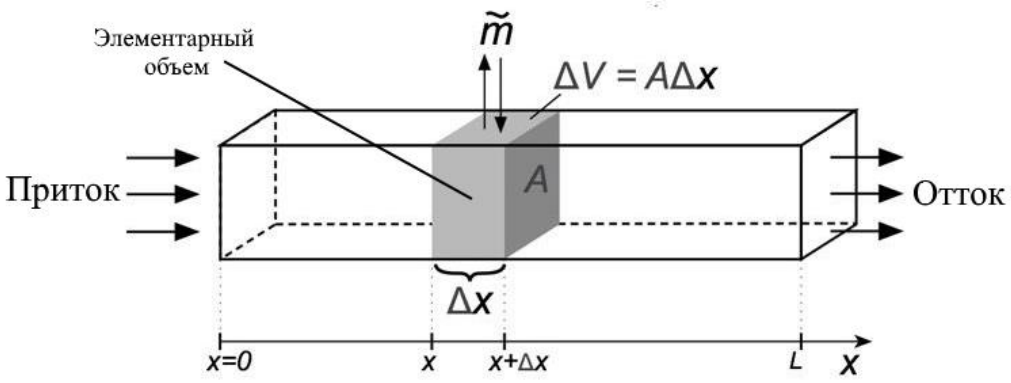


Рисунок 1 – Схема одномерной фильтрации в образце породы

Пусть $\dot{m}_x$ — составляющая вектора потока массы флюида (расход массы через единицу площади в единицу времени) плотностью ρ (одна фаза, один компонент) вдоль оси *x*. Из рис. 1 видно, что приток массы через поверхность элементарного объема с координатой *x* за время Δ*t* составляет $\dot{m}_x\big|_x A\Delta t,$ а отток массы через поверхность элементарного объема с координатой *x*+Δ*x* составит $\dot{m}_x\big|_{x+\Delta x} A\Delta t.$ Разница между поступающей и отбираемой массой равна приращению массы в элементарном объеме. Приращение массы в результате действия сжимаемости за время Δ*t* равняется, $\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi\Delta V)\right]\Delta t,$ а изменение массы благодаря действию источника или стока интенсивностью $\tilde{m}$ (масса единицы объема в единицу времени) за время Δ*t* – $\tilde{m}\Delta V\Delta t.$ Таким образом, уравнение движения флюида через блок:

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

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

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

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

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

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

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

Непрерывная математическая модель неустановившейся фильтрации

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

$$-\left(\frac{\partial \rho\phi}{\partial t}\right)=\frac{\partial(\rho w_X)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho w_Y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w_Z)}{\partial z},$$

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

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

В результате математическая модель неустановившейся фильтрации газа имеет вид:

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

$$\beta_{\text{п}}=-\frac{1}{V}\frac{\partial V}{\partial p}=\frac{\partial \phi}{\partial p},\quad \beta_{\text{г}}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial p},$$

где κ – коэффициент пьезопроводности, $\beta_П;\beta_Г$ – коэффициенты сжимаемости породы и газа соответственно.

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

Построение численной модели фильтрации

Дискретизация уравнения неустановившейся фильтрации для одномерного случая.

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

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

1	2		i-1	i	i+1		N-1	N

Рисунок 2 – Продуктивный пласт, дискретизированный на N блоков

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

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

Вынесем временную и пространственную составляющие в виде отдельного множителя:

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

Тогда уравнение одномерной фильтрации примет вид:

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

Система уравнений для блоков в матричной форме:

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

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

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

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

Для удобства, введем соответствующие переменные для блоков:

$$B_i = \frac{V \phi c_t}{B_w}, \; T_i = \frac{kA}{\mu B_w \Delta_x}.$$

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

$$\left[\underbrace{\frac{1}{\Delta t}\begin{pmatrix} B_1 & & & \\ & B_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & B_N \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}} + \underbrace{\begin{pmatrix} T(1+2\omega_1) & -T & 0 & 0 \\ -T & 2T & -T & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & -T & T(1+2\omega_2) \end{pmatrix}}_{\mathbf{T}} \right]$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_N \end{pmatrix}^{n+1}}_{\mathbf{p}^{n+1}} = \frac{1}{\Delta t} \underbrace{\begin{pmatrix} B_1 & & & \\ & B_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & B_N \end{pmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_N \end{pmatrix}^{n}}_{\mathbf{p}^{n}} + \underbrace{\begin{pmatrix} 2\omega_1 T\, p_{B1} \\ 0 \\ \vdots \\ 2\omega_2 T\, p_{B2} \end{pmatrix}}_{\mathbf{Q}},$$

$$\omega = \begin{cases} 0, & \text{если граничные условия Неймана (2 рода)} \\ 1, & \text{если граничные условия Дирихле (1 рода)}, \end{cases}$$

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

Или кратко:

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

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

Дискретизация уравнения неустановившейся фильтрации для двумерного случая.

Рассмотрим двумерный пласт длиной L и шириной W (рис. 3). Дискретизация по пространству выполняется путем разбиения области пласта на NX и NY узлов. Суммарное число блоков составляет $N = NX \times NY$. Каждый конечный объем обозначается индексами i и j (номер

узла сетки в направлении *x* и *y* соответственно). Вместе с тем, возможна нумерация блоков одним целочисленным индексом, что является удобным при разработке алгоритмов для компьютерной модели. В данной работе принята нумерация пространственных блоков, в соответствии с соотношением: $l=(j-1)NX+i$ [4].

j=*NY*=3	9	10	11	12
j=2	5	6	7	8
j=1	1	2	3	4
	i=1	*i*=2	*i*=3	*i*=*NX*=4

Рисунок 3 – Продуктивный пласт, дискретизированный по пространству с использованием *l* – нумерации

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

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

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

Моделирование скважин

В рамках данной работы рассматривается случай однофазной фильтрации газа, при допущениях, что продуктивный пласт, вскрывается совершенными скважинами с вертикальным окончанием, которые интерпретируются как внутренние границы пласта. Моделируемые скважины располагаются в центре блока. В пластовых симуляторах наиболее распространены два типа граничных условий (не считая смешанных): в виде заданного давления на забое (граничные условия 1 рода) или в виде заданного дебита скважины (граничные условия 2 рода). При такой постановке возможен расчет забойного давления, при заданном дебите и наоборот – расчет дебита, при заданном забойном давлении в зависимости от времени. Существует несколько связывающих соотношений для расчета неизвестных: модель Ван-Полена, модель

Писмана и модель Абу-Кассема и Азиза. В настоящее время модель Ван-Полена почти не используется [4], а модель Абу-Кассема и Азиза удобна для расчетов при расположении скважин не в центре блоков. Поэтому, для учета скважин в данной работе используется модель Писмана, которая хорошо подходит для расчетов в блочно-центрированных сетках. Согласно данной модели радиус, при котором давление в блоке со скважиной соответствует средневзвешенному давлению в пласте (эквивалентный радиус) для случая квадратной сетки, задается следующим соотношением:

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

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

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

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

Вычислительный эксперимент

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

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

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

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

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

Параметр	**Значение**
Длина пласта (м)	3000
Ширина пласта (м)	3000
Высота пласта (м)	20
Пористость (д. ед.)	0,2
Проницаемость коллектора ($м^2$)	$12,9\cdot10^{-15}$
Начальное давление (Па)	$7\cdot10^{6}$
Вязкость газа (Па·с)	$2\cdot10^{-5}$
Координаты (x ; y) добывающей скважины №1 (м)	(1000; 1500)
Координаты (x ; y) добывающей скважины №2 (м)	(2000; 1500)

Параметр	**Значение**
Расход газа в добывающей скважине №1 ($м^3$/сут)	$360 \cdot 10^3$
Расход газа в добывающей скважине №2 ($м^3$/сут)	$480 \cdot 10^3$

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

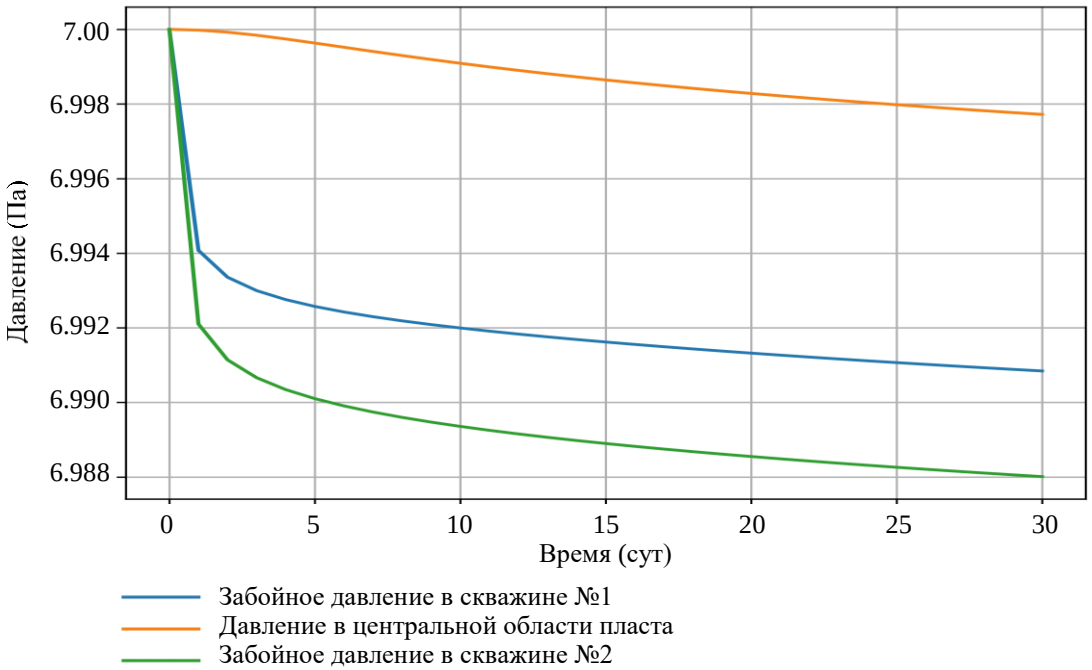


Рисунок 4 – Давление на забоях скважин и центральной точке пласта в зависимости от времени

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

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

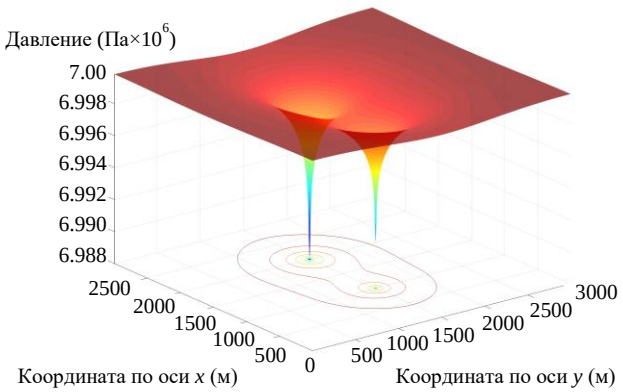


Рисунок 5 – Распределение давления в пласте на конечное время моделирования

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

Таблица 2 – Быстродействие использованных методов (процессор Intel Core i5-6500 (3200MHz) и 16 Gb ОЗУ)

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

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

Заключение

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.

2. Куштанова, Г.Г. Подземная гидромеханика. Казань: Изд-во Казан. (Приволж.) федер. ун-та, 2010. – 67 с.

3. Алишаев М.Г. Моделирование и расчёт в прикладной механике и добыче нефти. Махачкала: Изд-во АЛЕФ, 2015. – 288 с.

4. Эртекин Т., Абу-Кассем Дж., Кинг Г. Основы прикладного моделирования пластов. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 1060 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-417-429

Хаджиев Александр Ахилесович

Северо-Кавказский Федеральный Университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Аннотация. *Управление теплоснабжением жилых помещений это актуальная проблема, которую можно решить, используя различные регуляторы. В данной работе рассматривается использование регулятора прямого действия.*

Ключевые слова: *тепловые процессы, математическая модель, система управления, распределенный регулятор прямого действия.*

Abstract. *Management of heat supply of premises is an actual problem which can be solved, using various regulators. In this paper we consider the use of direct-acting regulator.*

Key words: *thermal processes, mathematical model, control system, the distributed controller of direct action.*

Введение.

Все помещения, в которых находятся люди, должны обеспечивать нормальные условия жизни независимо от температуры вне помещения. Поэтому вопрос обогрева является главным и актуальным при оценке комфорта, удобства, экономичности постройки и проживания.

Одним из способов поддержания в холодное время года комфортной температуры жилого помещения является водяное отопление. Основной принцип работы - жидкий теплоноситель (нагретая вода, антифриз) передает тепло, протекая по трубопроводам через подсоединенные радиаторы.

Система водяного отопления - эта система получил наибольшее распространение. Водяная система отопления использует в качестве теплоносителя воду. Воду нагревают в котлах, затем по трубам она попадает в радиаторы и, передав тепло, возвращается обратно. Данная система является замкнутой.

Водяной теплый пол - это отопительная система, рабочим органом которой являются трубы с циркулирующим теплоносителем, расположенные под чистовым покрытием пола. Источником тепла становится вся свободная поверхность пола, для наиболее комфортных ощущений температуру можно настраивать как вручную, так и в автоматическом режиме.

Водяной теплый пол - многослойная система. Для функционирования ее в правильном безопасном режиме требуется наличие нескольких слоев, выполняющих определенные функции.

Настройка температуры теплого пола - очень важная и ответственная функция, осуществляет которую смесительный узел.

Питание системы может осуществляться как от сети центрального отопления, так и от собственного котла в автономном режиме, что увеличивает привлекательность системы для пользователей.

В составе системы водяного теплого пола входят:

– трубы с циркулирующим по ним теплоносителем;

– узел смешения, состоящий из коллектора, циркуляционного насоса и двух- или трехходового клапана;

– котел отопления, осуществляющий нагрев теплоносителя;

– соединительные трубопроводы, измерительные устройства, запорная арматура и т. д.

Рабочий орган - трубы с теплоносителем - разделены на равные части, называемые контурами. Такое деление облегчает работу циркуляционного насоса, выравнивает температурный перепад между началом и концом контура. Контуры располагаются внутри слоев пола, в бетонной стяжке или без нее, под напольным покрытием.

Порядок размещения труб таков, что они равномерно занимают всю полезную площадь комнаты. Температура теплоносителя в контурах относительно невысока - около 50 градусов.

Регулирует процесс двух- или трехходовой клапан, выполняющие функцию ограничителей количества горячего прямого потока, поступающего в систему контуров. При необходимости режим подмеса можно изменить, увеличивая или уменьшая температуру теплоносителя.

Большая площадь, занимаемая контурами, приводит к изменению физических процессов, происходящих при обогреве помещения. Обычной для радиаторных систем конвекции в данном случае нет, поскольку температура поверхности не настолько высока, чтобы вызывать интенсивное движение и циркуляцию воздуха.

Кроме того, вся поверхность пола равномерно теплая, нет участков с более низкой температурой. Поэтому происходит не циркуляция, а излучение тепловой энергии, которое способствует созданию комфортной и уютной обстановки в помещении, но требует точной регулировки.

Математическая модель представляет собой выражение или формулу, включающую переменные и отношения между ними, воспроизводящие элементы и отношения в изучаемом явлении. Тип математической модели выбирается в зависимости от природы реального объекта, процессов, протекающих в нём и вокруг него, а также задач исследования объекта и требуемой достоверности и точности решения этой задачи. Любая математическая модель описывает реальный объект с некоторой степенью приближения к действительности. Целью создания математической модели является анализ и синтез реальных процессов математическими методами.

Компьютерное моделирование - это моделирование объекта с использованием математических моделей и средств вычислительной техники. Компьютерное моделирование представляет собой один из наиболее эффективных способов исследования сложных объектов и систем.

Компьютерное моделирование заключается в проведении серии вычислительных экспериментов на компьютере, целью которых является анализ, интерпретация и сопоставление результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта, а также верификация, то есть уточнение модели и т. д.

Моделирование является одним из легких способов визуализировать, рассчитать и апробировать новые разработки, что позволяет сэкономить деньги и трудовые ресурсы, которые будут затрачиваться на создание реальных объектов [7, с. 166-168].

Численное моделирование объекта управления.

Объектами для моделирования в данной работе будут взяты комнаты 1,2,3,4,5,6 из схемы, изображенной на рисунке 1. Геометрические размеры комнат представлены в таблице 1. Граничные условия комнат представлены в таблице 2.

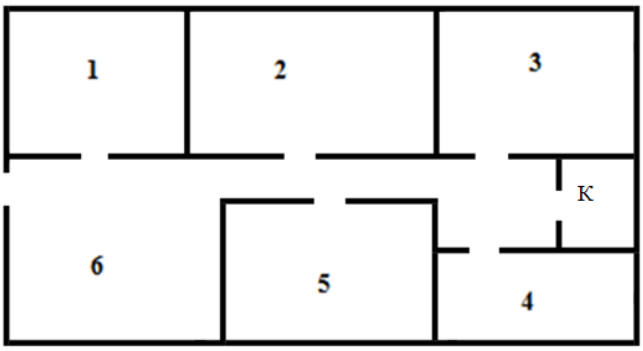


Рисунок 1– Схема жилого дома

Таблица 1 – Геометрические параметры объектов

Комнаты	Lx, M.	Ly, M.	Lz, M.	Ly2, M.	Lz3, M.	Lz4, M.	Lz5, M.
1	3	3	2.5	0.5	0.1	0.01	0.03
2	4	3	2.5	0.5	0.1	0.01	0.03
3	3	3	2.5	0.5	0.1	0.01	0.03
4	3	2	2.5	0.5	0.1	0.01	0.03
5	3	3	2.5	0.5	0.1	0.01	0.03
6	4	4	2.5	0.5	0.1	0.01	0.03

Lx, Ly, Lz - длина, ширина, высота комнат, Ly2 - ширина внешней стены, Lz3 - высота бетонной стяжки, Lz4 - высота плитки, Lz5 - высота теплоносителя.

Таблица 2 – Граничные условия

Комнаты	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	1	T2	1	1	T2	T1
2	1	1	1	1	T2	T1
3	1	1	1	T2	T2	T1
4	1	1	T2	T2	1	T1
5	1	1	T2	1	1	T1
6	1	T2	T2	1	1	T1

1 – граничное условие второго рода, T1 (50) и T2 (-20) заданная температура.

Жилые комнаты представляет собой параллелепипед, крыша, пол и внутренние стены которых теплоизолированы, на внешние стены воздействует температура T2, в полу проходит слой теплоносителя, который греет бетон заданной температурой T1, бетон прогревает плитку, а плитка в свою очередь греет комнату.

На рисунке 2 представлена схематическая модель, взятая для заданных комнат.

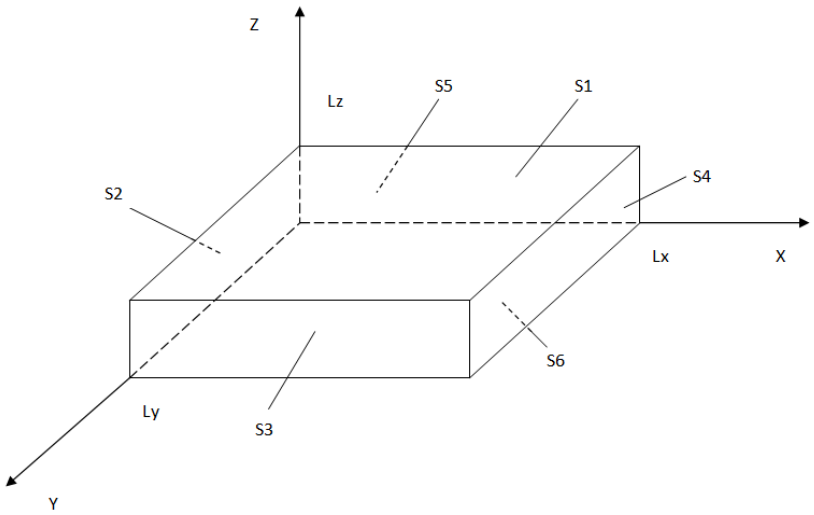


Рисунок 2 – Схематическая модель объекта

Для комнаты 2, 5 уравнения, описывающие распространение тепла состоят из 5 слоев:

1. $$\frac{\partial^2 T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_1 * \left(\frac{\partial^2 T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z^2} \right)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0;$$

2. $$\frac{\partial^2 T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_2 * \left(\frac{\partial^2 T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y2^2} + \frac{\partial^2 T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z^2} \right)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_{y2}, 0 < z < L_z, \tau \geq 0;$$

3. $$\frac{\partial^2 T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_3 * \left(\frac{\partial^2 T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z3^2} \right)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0;$$

4. $$\frac{\partial^2 T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_4 * \left(\frac{\partial^2 T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z4^2} \right)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0;$$

5. $$\frac{\partial^2 T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_5 * \left(\frac{\partial^2 T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z5^2} \right) - \nu \cdot \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x}$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z5}, \tau \geq 0;$$

где x, y, z – пространственные координаты, τ – время, $\partial\tau$ – шаг дискретизации по τ, ∂x, ∂y, ∂z, $\partial y2$, $\partial z3$, $\partial z4, \partial z5$ – шаги дискретизации по осям $L_x, L_y, L_z, L_{y2}, L_{z3}, L_{z4}, L_{z5}$ соответственно, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 - \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – температуропроводность сред, ν – скорость движения теплоносителя.

Для комнаты 1, 3, 4, 6 уравнения, описывающие распространение тепла состоят из 6 слоев:

1. $$\frac{\partial^2 T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_1 * \left(\frac{\partial^2 T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z^2} \right)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0;$$

2. $$\frac{\partial^2 T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_2 * \left(\frac{\partial^2 T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y2^2} + \frac{\partial^2 T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z^2} \right).$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_{y2}, 0 < z < L_z, \tau \geq 0;$$

3. $$\frac{\partial^2 T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_2 * \left(\frac{\partial^2 T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x2^2} + \frac{\partial^2 T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z^2} \right)$$

$$0 < x < L_{x2}, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0;.$$

4. $$\frac{\partial^2 T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_3 * \left(\frac{\partial^2 T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z3^2} \right)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0;$$

5. $$\frac{\partial^2 T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_4 * \left(\frac{\partial^2 T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z4^2} \right)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0;$$

6. $$\frac{\partial^2 T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial \tau} = a_5 * \left(\frac{\partial^2 T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z5^2} \right) - \nu \cdot \frac{\partial T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x}$$

где x, y, z – пространственные координаты, τ – время, $\partial\tau$ – шаг дискретизации по τ, ∂x, ∂y, $\partial z, \partial x2, \partial y2$, $\partial z3$, $\partial z4, \partial z5$ – шаги дискретизации по осям L_x, L_y, L_z, $L_{x2}, L_{y2}, L_{z3}, L_{z4}, L_{z5}$ соответственно, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – температуропроводность сред, ν – скорость движения теплоносителя.

Начальные и граничные условия для 2, 5 комнат, представлены ниже:

$$T_{(x,y,z,\tau=0)} = 0, \ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z;$$

$$S_1 \to 1; \ \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, z = L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to 1; \ \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0, \ x = 0, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to 1; \ \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1; \ \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0, \ x = L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_5 ГРС \to T_1 = -T_2; \ \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y}, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_6 ГРС \to T_1 = -T_1; \ \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = \lambda_4 \cdot \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z}, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, \ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T2_{(x,y,z,\tau=0)} = 0, \ 0 < x < L_x, 0 < y < L_{y2}, 0 < z < L_z;$$

$$S_1 \to 1; \ \frac{\partial T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_{y2}, z = L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to \text{const};\ T2_{(x,y,z,\tau)} = \text{const},\ x = 0, 0 < y < L_{y2}, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to 1;\ \frac{\partial T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to \text{const};\ T2_{(x,y,z,\tau)} = \text{const},\ x = L_x, 0 < y < L_{y2}, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to T_2;\ T2_{(x,y,z,\tau)} = T_2, 0 < x < L_x, y = L_{y2}, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_6 \to 1;\ \frac{\partial T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_{y2},\ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T3_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3};$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, z = L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to 1;\ \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = 0, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to 1;\ \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = L_y, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1;\ \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to 1;\ \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_6 \text{ГРС} \to T_1 = -T_1;\ \lambda_3 \cdot \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = \lambda_5 \cdot \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z}, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y,\ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T4_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z4};$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, z = L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = 0, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = L_y, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_6 \text{ГРС} \to T_1 = -T_1;\ \lambda_4 \cdot \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = \lambda_3 \cdot \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z}, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y,\ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T5_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z5};$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, z = L_{z5}, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = 0, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z5}, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0,\ 0 < x < L_x,\ y = L_y,\ 0 < z < L_{z5},\ \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = L_x,\ 0 < y < L_y,\ 0 < z < L_{z5},\ \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0,\ 0 < x < L_x,\ y = 0,\ 0 < z < L_{z5},\ \tau \geq 0.$$

$$S_6 \to T_1;\ T5_{(x,y,z,\tau)} = T_1,\ 0 < x < L_x,\ 0 < y < L_y,\ z = 0,\ \tau \geq 0.$$

В граничных условиях теплопроводность материалов обозначается: λ_1 – теплопроводность воздуха, λ_2 – теплопроводность кирпича, λ_3 – теплопроводность бетона, λ_4 – теплопроводность мрамора, λ_5 – теплопроводность воды.

Моделируемый объект состоит из пяти сред (параметры заданы в системе СИ): воздух $(\lambda_1 = 0.23,\ p1 = 12,\ c1 = 1005)$, кирпич $(\lambda_2 = 5,\ p2 = 1600,\ c2 = 6009.61)$, бетон $(\lambda_3 = 1.51,\ p3 = 840,\ c3 = 2400)$, мрамор $(\lambda_4 = 2.9,\ p4 = 880,\ c4 = 2800)$, вода $(\lambda_5 = 0.6,\ p5 = 1000,\ c5 = 4195.8)$.

Коэффициенты температуропроводности $\alpha\left(\frac{м^2}{сек}\right)$ определяются по формуле $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot p}$, где $p\left(\frac{кг}{м^3}\right)$ – плотность, $\lambda\left(\frac{Вт}{м \cdot град}\right)$ – теплопроводность материала, $c\left(\frac{Дж}{кг \cdot град}\right)$ – коэффициент теплоемкости

Подставляя значения в формулы получим:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{p_1 \cdot c_1} = \frac{0.23}{12 \cdot 1005} = 1,907 \cdot 10^{-5}$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{p_2 \cdot c_2} = \frac{5}{1600 \cdot 6009.61} = 5,2 \cdot 10^{-7}$$

$$\alpha_3 = \frac{\lambda_3}{p_3 \cdot c_3} = \frac{1.51}{840 \cdot 2400} = 7,49 \cdot 10^{-7}$$

$$\alpha_4 = \frac{\lambda_4}{p_4 \cdot c_4} = \frac{2.9}{880 \cdot 2800} = 1,176 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_5 = \frac{\lambda_5}{p_5 \cdot c_5} = \frac{0.6}{1000 \cdot 4195.8} = 1,43 \cdot 10^{-7}$$

Начальные и граничные условия для 1, 3, 4, 6 комнат, представлены ниже:

$$T_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ 0 < x < L_x,\ 0 < y < L_y,\ 0 < z < L_z;$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0,\ 0 < x < L_x,\ 0 < y < L_y,\ z = L_z,\ \tau \geq 0.$$

$$S_2 ГРС \to T_1 = -T_2\ ;\ \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y},\ x = 0,\ 0 < y < L_y,\ 0 < z < L_z,\ \tau \geq 0.$$

$$S_3 ГРС \to T_1 = -T_2;\ \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y},\ 0 < x < L_x,\ y = L_y,\ 0 < z < L_z,\ \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1;\ \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_5 = 1;\ \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_6 ГРС \to T_1 = -T_1;\ \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = \lambda_4 \cdot \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z}, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y,\ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T2_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_{y2}, 0 < z < L_z;$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_{y2}, z = L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to \text{const};\ T2_{(x,y,z,\tau)} = \text{const},\ x = 0, 0 < y < L_{y2}, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to T_2;\ T2_{(x,y,z,\tau)} = T_2, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to \text{const};\ T2_{(x,y,z,\tau)} = \text{const},\ x = L_x, 0 < y < L_{y2}, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to 1;\ \frac{\partial T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = T_2, 0 < x < L_x, y = L_{y2}, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_6 \to 1;\ \frac{\partial T2_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_{y2},\ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T3_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ 0 < x < L_{x2}, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3};$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_{x2}, 0 < y < L_y, z = L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to T_2;\ T3_{(x,y,z,\tau)} = T_2,\ x = 0, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to \text{const};\ T3_{(x,y,z,\tau)} = \text{const}, 0 < x < L_{x2}, y = L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1;\ \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = L_{x2}, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to \text{const};\ T3_{(x,y,z,\tau)} = \text{const}, 0 < x < L_{x2}, y = 0, 0 < z < L_z, \tau \geq 0.$$

$$S_6 = 1;\ \frac{\partial T3_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_{x2}, 0 < y < L_y,\ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T4_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3};$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, z = L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = 0, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = L_y, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to 1;\ \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_{z3}, \tau \geq 0.$$

$$S_6 ГРС \to T_1 = -T_1;\ \lambda_3 \cdot \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = \lambda_5 \cdot \frac{\partial T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z},\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y,\ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T5_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ \ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z4};$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, z = L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = 0, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = L_y, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to 1;\ \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_{z4}, \tau \geq 0.$$

$$S_6 ГРС \to T_1 = -T_1;\ \lambda_4 \cdot \frac{\partial T5_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = \lambda_3 \cdot \frac{\partial T4_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z},\ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y,\ z = 0, \tau \geq 0.$$

$$T6_{(x,y,z,\tau=0)} = 0,\ \ 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z5};$$

$$S_1 \to 1;\ \frac{\partial T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial z} = 0, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, z = L_{z5}, \tau \geq 0.$$

$$S_2 \to 1;\ \frac{\partial T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = 0, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z5}, \tau \geq 0.$$

$$S_3 \to 1;\ \frac{\partial T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = L_y, 0 < z < L_{z5}, \tau \geq 0.$$

$$S_4 \to 1;\ \frac{\partial T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial x} = 0,\ x = L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z5}, \tau \geq 0.$$

$$S_5 \to 1;\ \frac{\partial T6_{(x,y,z,\tau)}}{\partial y} = 0, 0 < x < L_x, y = 0, 0 < z < L_{z5}, \tau \geq 0.$$

$$S_6 \to T_1;\ T6_{(x,y,z,\tau)} = T_1, 0 < x < L_x, 0 < y < L_y,\ z = 0, \tau \geq 0.$$

В граничных условиях теплопроводность материалов обозначается: λ_1 – теплопроводность воздуха, λ_2 – теплопроводность кирпича, λ_3 – теплопроводность бетона, λ_4 – теплопроводность мрамора, λ_5 – теплопроводность воды.

Моделируемый объект состоит из пяти сред (параметры заданы в системе СИ): воздух $(\lambda_1 = 0.23,\ p1 = 12,\ c1 = 1005)$, кирпич $(\lambda_2 = 5,\ p2 = 1600,\ c2 = 6009.61)$, бетон $(\lambda_3 = 1.51,\ p3 = 840,\ c3 = 2400)$, мрамор $(\lambda_4 = 2.9,\ p4 = 880,\ c4 = 2800)$, вода $(\lambda_5 = 0.6,\ p5 = 1000,\ c5 = 4195.8)$.

Коэффициенты температуропроводности $\alpha\left(\frac{м^2}{сек}\right)$ определяются по формуле $\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot p}$, где $p\left(\frac{кг}{м^3}\right)$ – плотность, $\lambda\left(\frac{Вт}{м \cdot град}\right)$ – теплопроводность материала, $c\left(\frac{Дж}{кг \cdot град}\right)$ – коэффициент теплоемкости

Подставляя значения в формулы получим:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{p_1 \cdot c_1} = \frac{0.23}{12 \cdot 1005} = 1,907*10^{-5}$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{p_2 \cdot c_2} = \frac{5}{1600 \cdot 6009.61} = 5,2 \cdot 10^{-7}$$

$$\alpha_3 = \frac{\lambda_3}{p_3 \cdot c_3} = \frac{1.51}{840 \cdot 2400} = 7,49 \cdot 10^{-7}$$

$$\alpha_4 = \frac{\lambda_4}{p_4 \cdot c_4} = \frac{2.9}{880 \cdot 2800} = 1,176 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_5 = \frac{\lambda_5}{p_5 \cdot c_5} = \frac{0.6}{1000 \cdot 4195.8} = 1,43 \cdot 10^{-7}$$

Полученные системы уравнений, с учетом заданных граничных условий, будем решать с использованием вычислительной техники.

Промоделировав все комнаты, были получены переходные процессы. На рисунке 3 показаны графики переходных процессов разомкнутых систем, для заданных комнат.

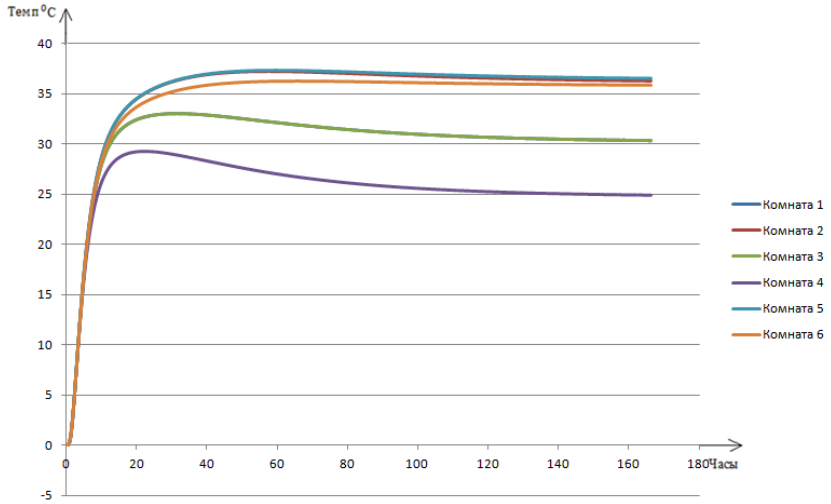


Рисунок 3 – Графики переходных процессов

Проектирование системы управления. Рассматриваемая система управления состоит из 2-х контуров. Схема система управления 1-го контура представлена на рисунке 4. Данная схема регулирует температуру в котле и во всех теплоносителях по отклонению от заданной температуры.

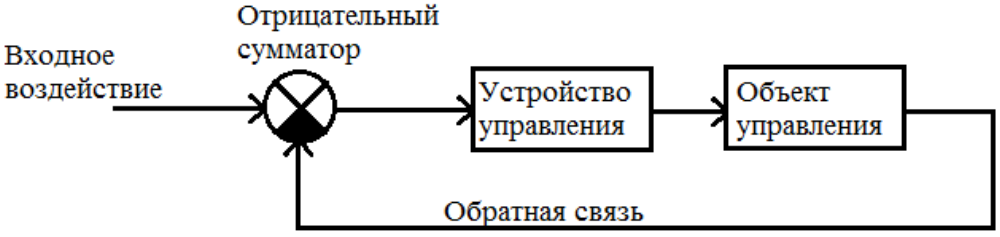


Рисунок 4 – Схема системы управления 1-го контура

В дополнении к 1-му контуру, было решено использовать 2-ой, который будет более точно регулировать температуру заданной комнаты. Схема система управления 2-го контура внутри 1-го представлена на рисунке 5. Схемы укладки труб в комнатах может быть различной.

Использование регулятор прямого действия (РПД) позволит перераспределять тепловую энергию в комнатах, в зависимости от заданной температуры для каждой комнаты.

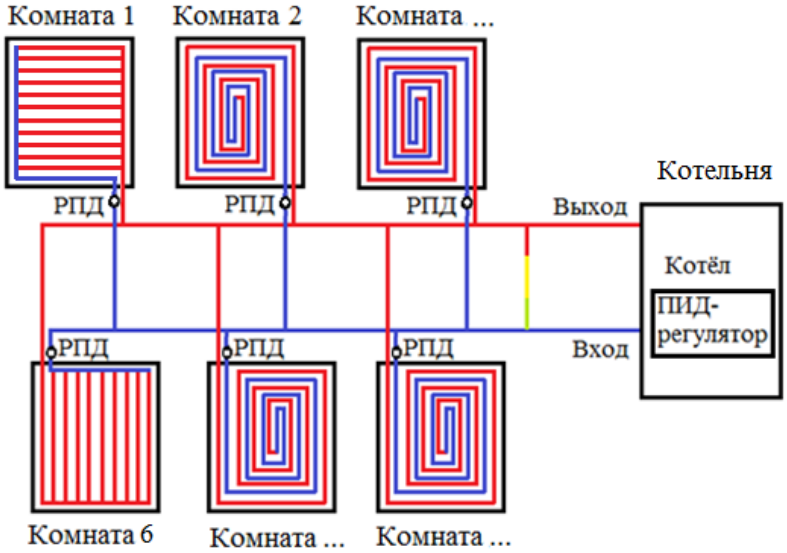


Рисунок 5 – Схема системы управления 2-го контура внутри 1-го

Переходя к процедуре синтеза регулятора необходимо уделить внимание формулировке требований, которым должен отвечать синтезированный регулятор.

Для системы управления будем использовать пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор и регулятор прямого действия.

ПИД регулятор, встроенный в управляющий контур, с обязательной обратной связью. Он предназначен для поддержания установленных уровней задаваемых величин, например, температуры воздуха. Работа ПИД-регулятора заключается в подаче выходного сигнала о силе мощности, необходимой для поддержания регулируемого параметра на заданном уровне. Для вычисления показателя используют сложную математическую формулу, в составе которой есть 3 коэффициента - пропорциональный, интегральный, дифференциальный.

Регуляторами прямого действия называются устройства, которые осуществляют регулирование рабочих параметров среды, используя при этом энергию самой регулируемой среды. То есть, для работы таких устройств не требуются никакие источники энергии. Название «регулятор давления прямого действия» на самом деле объединяет целый класс разных регуляторов. К ним относятся устройства, регулирующие давление «до себя», осуществляющие регулирование «после себя», а также те приборы, которые регулируют перепад давления.

Область применения распределенных регуляторов прямого действия может быть достаточно широкой. Эти регуляторы управляют «живым» сечением канала текущей жидкости и используются в системах подвода (отвода) тепловой энергии.

В зависимости от интенсивности теплового потока теплоноситель каждой секции нагревается (охлаждается), а следовательно регулятор (биметаллическая пластинка), помещенный в поток теплоносителя, увеличивает (уменьшает) живое сечение каналов, осуществляя регулирование расхода теплоносителя через заданную секцию.

Биметаллическая пластинка (Б.П.) изготовлена из материалов А – активного (обладающим большим коэффициентом теплового расширения) и В – пассивного (обладающим малым коэффициентом расширения). Б.П. помещена в поток теплонесущей жидкости. При этом омывается потоком одна плоскость Б.П., а другая находится в «тени» потока. У обтекаемой потоком поверхности Б.П. формируется пограничный слой, толщина которого зависит от физических свойств теплонесущей жидкости. Изменение температурного поля на границе пограничного слоя приводит к изменению температуры внутри слоя, а следовательно изменяется температурное поле Б.П.

Так как, один конец Б.П. закреплен, а второй свободен. Изменение температурного поля Б.П. приводит к перемещению свободного конца пластинки на определенную величину.

Регулировка скорости движения теплоносителя в каналах коллектора, а следовательно интенсивности подвода тепловой энергии, осуществляется регулятором прямого действия (биметаллической пластинкой, которая является и датчиком и исполнительным устройством).

Скорость движения теплоносителя определяется по следующей формуле:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\left(\frac{\lambda_r}{L_x} + \xi_{M_1}\right) * \rho}}$$

где ρ - плотность теплоносителя; ΔP - разность давлений на входе и выходе канала, λ_r - динамическая вязкость теплоносителя, $\lambda_r = 0.001004$, ξ_{M_1} - потери напора вследствие изменения «живого» сечения.

На рисунке 6 изображен переходный процесс регулятора прямого действия включенного в системы управления заданных комнат.

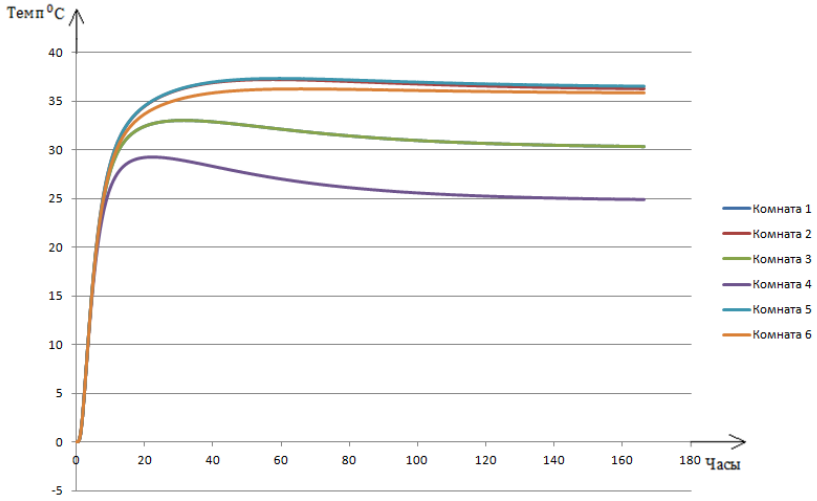


Рисунок 6 – Графики переходных процессов комнат с РПД-регулятором

Заключение.

Управление теплоснабжением жилых помещений это сложный процесс, решение которого должно проходить с соблюдением всех норм и положений. В данной работе был рассмотрен РПД, в ходе моделирования анализ замкнутой системы управления показал, что система управления обеспечивает заданный уровень нагрева помещений. 1-ый контур управления реализует ПИД закон управления и обеспечивает 0% ошибку регулирования. 2-ой контур управления реализует РПД, который обеспечивает ошибку регулирования не превышающую 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

7. Владимиров В.С., Жаринов В.В. Уравнения математической физики.- Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2004.- 400 с.

8. Душин С.Е. Теория автоматического управления: учебник для вузов.- Москва: Высшая школа, 2009.- 567 с.

9. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики.- Москва: Наука, 1970.- 712 с.

10. Лыков А.В. Теория теплопроводности.- Москва: Высшая школа, 1967.- 600 с.

11. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. - Москва: Научный мир, 2012. - 476 с.

12. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. - Пятигорск: РИА КМВ, 2007. - 243 с.

13. Хаджиев А.А., Русак С.Н. Генезис моделирования. Роль моделирования в технологическом процессе// Аллея науки. 2017. Т. 1. № 14. С. 165-168.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-430-439

Абрамкин Сергей Евгеньевич (1), Душин Сергей Евгеньевич (1)

1. Санкт–Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. *Цель – выявить проблемы управления технологическими процессами газодобывающих комплексов. Решаемые задачи: анализ газодобывающего комплекса как объекта управления, разработка концептуальной модели управления им, экспериментальное компьютерное исследование технологических процессов газодобывающего комплекса. Краткие выводы: Определены проблемы управления газодобывающими комплексами. Представлена концепция управления на основе киберфизического подхода. Приведены результаты экспериментов показавшие, что необходима разработка многорежимной и многомерной системы управления газодобывающим комплексом.*

Ключевые слова: *газодобывающий комплекс, киберфизический подход, пластовая фильтрационная система, абсорбционная осушка, массообменные процессы, математическое моделирование, многорежимное управление.*

Annotation. *The goal is to identify the problems of controlled technological processes of gas production complexes. Tasks to be solved: analysis of the gas production complex as an object of control, developing a conceptual model for the control, an experimental computer study of the technological processes at the gas production complex. Brief conclusions: Problems of automatic control of gas-producing complexes are defined. A concept for a control system based on a cyber-physical approach is presented. The results of experiments have shown that it is necessary to develop a multi-mode and multi-dimensional control system for the gas-producing complex.*

Keywords: *Gas Production Complex, Cyber-Physical Approach, Reservoir Filtration System, Absorption Dewatering, Mass Transfer Processes, Mathematical Modeling, Multi-mode Control.*

Введение.

Крупнейшие месторождения Крайнего Севера Медвежье, Уренгойское и Ямбургское находятся в стадии падающей добычи. Поэтому поддержание добычи природного газа на заданном уровне связано с мегапроектами ПАО «Газпром» «Ямал» и «Восточная газовая программа». При реализации данных проектов внедряются новые технологические решения, построенные на концепции малолюдных технологий. Основной проблемой в реализации данной концепции является разработка автоматизированных газодобывающих комплексов (ГДК) [1], которые включают в себя объекты добычи, подготовки и компримирования газа. При этом управление ГДК должно обеспечиваться единым комплексным алгоритмом. Целевой функцией автоматизированного ГДК является обеспечение практически неизменной производительности промысла с учетом экономической целесообразности [1].

Реализация данной целевой функции в рамках традиционных подходов к построению систем управления ГДК не дает желаемого результата. Этим обусловлена актуальность разработки новых принципов организации автоматизированного ГДК с применением современных методов синтеза и проектирования нейро- и *fazzy*-управления, АКАР, робастного управления, оптимального управления на основе обратных задач математической физики, ортогональных проекций и т. д. Однако не все методы могут быть непосредственно использованы при пространственном описании объектов.

Управляемый газодобывающий комплекс. Газодобывающие комплексы являются объектами со сложными непрерывными технологическими процессами (ТП) характеризующимися энергетическими и материальными потоками большой мощности, а также с жесткими требованиями по производительности, качеству продукции, безопасности персонала, сохранности оборудования и воздействию на окружающую среду. Газодобывающий комплекс с учетом функционального назначения может быть представлен в виде каскадного соединения управляемых систем: газоносные пласты, скважины, газосборный коллектор, установка комплексной подготовки газа (УКПГ) (рис. 1).

На схеме управляемого ГДК приняты следующие обозначения:

– управляемые переменные Δp, $p_{\text{у}}$, $p_{\text{впк}}$, $p_{\text{мг}}$ – соответственно депрессия на пласт и давление устьевое, давление внутрипромыслового коллектора и давление магистрального газопровода;

– управляющее воздействие $Q_{\text{г}}$ – расход газа;

– возмущающие воздействия f_1, f_2, f_3, f_4, где f_1 – воздействия на пласт, связанные с изменением положения газоводяного контакта, перетоком газа из областей высокого в области низкого давления, изменением термобарических параметров и т. д.; f_2 – воздействия на скважины вследствие их аварийных и профилактических отключений, изменения отбора газа с промысла, образования кристаллогидратов в стволе скважины; f_3 – воздействия на газосборный коллектор в связи с образованием кристаллогидратов в трубопроводах при изменениях термобарических характеристик; f_4 – воздействия на УКПГ из-за изменения термобарических параметров и расхода газа в магистральном газопроводе.

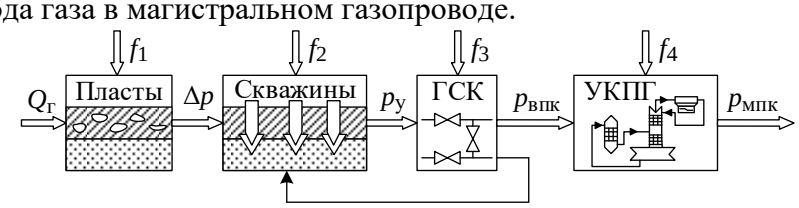


Рис. 1. Управляемый газодобывающий комплекс

Отметим, что основными регулируемыми параметрами являются давления газа на входах и выходах различных систем ГДК. Но если рассматривать каждую управляемую систему отдельно, то регулируемыми величинами могут быть так же температура, расход и т. п.

Структурно ГДК являются территориально распределенными системами с многочисленными управляемыми объектами добычи, сбора и подготовки газа и конденсата. Сложность управления ими характеризуется [2], [3]:

– наличием различных типов пластовых фильтрационных систем (ПФС) (сеноманские, валанжинские, ачимовские залежи), а также одновременно-раздельной добычей из нескольких пластов;

– рассредоточенностью объектов добычи газа (скважин) и их совместной работой на общий газосборный коллектор;

– неоднородностью и неопределенностью пластовых пространств;

– разнотипностью структур сбора и технологий подготовки газа (абсорбционная осушка газа, низкотемпературная сепарация газа);

– реконфигурацией (изменением структуры) УКПГ во времени в связи с падением давления в пласте;

– наличием связи УКПГ с различной технологией подготовки газа через обвязочный трубопровод;

– неравномерностью отбора газа магистральным газопроводом.

В начале разработки любого месторождения природного газа осуществляется управление топологией (или структурой) ПФС [2]. Оно заключается во вскрытии залежи системой скважин с различными вариантами их расположения. Система скважин делит всю залежь на зоны дренирования. При пиковых нагрузках на пласт происходит его разрушение, прорывы в него краевой воды и подтягивание конусов подошвенной воды, характеризующиеся повышением газоводяного контакта. Устранение этих проблем осуществляется управлением:

– структурой ПФС, которое выражается в оптимизации расположения скважин с целью равномерного распределения пластового давления;

– поведением ПФС путем изменения дебитов добывающих скважин при заданных ограничениях.

Управление процессами осушки природного газа и извлечение конденсата на УКПГ имеет важнейшее значение для успешной работы газотранспортной системы. Природный газ, добываемый из подземных источников, насыщен капельной влагой, тяжелыми углеводородами и механическими примесями, что может создать аварийные ситуации при транспортировке газа по магистральным газопроводам. Также возможно образование гидратов, приводящее к снижению пропускной способности трубопроводов и повреждению технологического оборудования.

Изменение производительности УКПГ определяется давлением газа в магистральном газопроводе, создаваемым магистральной компрессорной станцией. При этом производительность ограничивается максимальным использованием пластовой энергии газа и пропускной способностью магистрального газопровода.

Разработка системы управления газодобывающим комплексом. Выше отмечено, что основной целевой функцией, реализуемой системой управления ГДК является обеспечение заданной производительности при условии предупреждения гидратообразования. Это достигается обеспечением требуемых качественных характеристик газа, характеризующихся содержанием в нем влаги и углеводородов [3]. Проблема эффективного управления работой ГДК не получила полностью адекватного решения. Это связано в значительной мере с отсутствием адекватных математических моделей (ММ) и алгоритмов диспетчерского управления всеми ТП ГДК. Применение ММ при проектировании систем управления ТП ГДК обусловлено требованиями СТО Газпрома [1]. Они предусматривают разработку единого комплексного алгоритма управления и системы поддержки принятия решений, основанных на моделировании процессов в режиме реального времени.

Традиционные подходы к построению систем управления ГДК, основанные на представлении ММ с сосредоточенными параметрами, не обеспечивают требуемый результат. Обычно исследование ТП на УКПГ завершается получением статических и динамических моделей отдельных устройств, а не всего комплекса в целом. Статические модели, по существу, определяют основные потоки субстанций при нормальной эксплуатации промышленных установок. Динамические модели, как правило, формируются в результате линеаризации при малых отклонениях от равновесных режимов и находят применение для разработки локальных контуров регулирования.

Накопленный опыт в этой области позволяет сделать вывод, что используемые ММ имеют низкий уровень соответствия реальным объектам, поскольку они не в состоянии адекватно отразить физику реальных ТП на нестационарных режимах, не позволяют формализовать все многообразие возмущающих факторов, которые в значительной степени влияют на различные показатели эффективности функционирования системы.

Параметры ГДК изменяются не только во времени, но и в пространстве, что позволяет рассматривать его как объект управления с распределенными параметрами. Соответственно описание ТП ГДК осуществляется с помощью динамических моделей в виде дифференциальных уравнений в частных производных. Ввиду сложности возникающих физических явлений и

нелинейного характера взаимодействующих фаз основным методом исследования таких систем становится численное моделирование процессов [4].

Некоторые современные направления разработки систем управления ГДК представлены в [5]–[9]. В настоящее время перспективу развития автоматизации и управления ТП ГДК связывают с разработкой и внедрением в производство киберфизических систем (КФС) (автономных систем, объединенных в одну глобальную сеть с использованием облачных технологий), что составляет суть программы «Индустрии 4.0». Именно концепцию КФС целесообразно положить в основу создания и эксплуатации современных систем управления ГДК [10].

Концептуальный подход к построению КФС можно интерпретировать на примере комплекса абсорбционной осушки природного газа (КАОПГ), входящего в состав УКПГ. Предполагается рассмотрение системы управления КАОПГ как нового объекта проектирования и эксплуатации более высокого уровня иерархии, представляющего собой взаимодействие физического объекта с его цифровой (компьютерной) моделью (ЦМ), иначе, цифровым двойником. Цифровая модель системы управления КАОПГ при этом является неотъемлемой частью КФС, хотя физическая часть системы должна работать и при отсутствии (отключении) цифрового двойника. Таким образом, ЦМ системы управления КАОПГ можно рассматривать как управляющее устройство для всей КФС, находящийся на более высоком уровне иерархии нежели контроллер, предназначенный только для управления физическим объектом. Следовательно, функции модели расширяются до управляющей [10].

Физическая система, состоящая из объекта управления (установки) и контроллера в замкнутом контуре регулирования по жидкой фазе, 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 реального времени, т. е. эксплуатации, что составляет важнейшую особенность работы КФС. По сути, здесь уместно говорить о синергетическом подходе, – теории самоорганизации неравновесных процессов, – рекомендуемом к практическому применению на современном этапе развития теории управления [11]. Именно такое системное образование двух взаимосвязанных и взаимодействующих в режиме реального времени динамических подсистем, стремящихся к самоорганизации, представляет собой КФС.

Киберфизический подход на стадиях проектирования и эксплуатации систем управления предъявляет к моделям 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» моделей 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 [12].

Согласованная работа физической системы (объекта) и ЦМ представлена на рис. 2. Измеренные и/или оцениваемые данные о состоянии физической системы (о динамической ситуации) сопоставляются с данными о состоянии ЦМ и в случае их несоответствия, производится коррекция ЦМ системы как в части модели объекта (т. е. осуществляется текущая идентификация объекта), так и в управляющей части (регулятора) модели. В свою очередь, по данным с ЦМ системы устройство идентификации и коррекции получает информацию для структурного синтеза или параметрической настройки контроллера (адаптация) либо формирования корректирующего сигнала физической системы. Ограничения на работу КФС связаны с временными затратами ЦМ на обработку входных данных и вычисления (моделирование процессов), которые практически не должны влиять на реальные ТП физической системы.

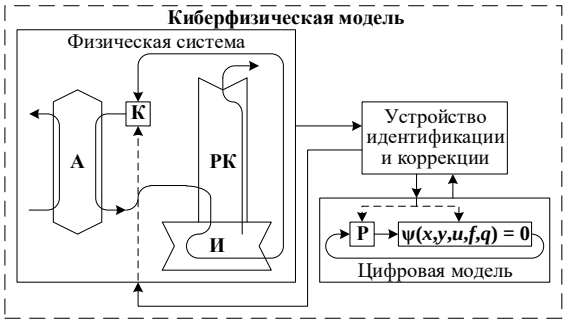


Рис. 2. Концептуальная схема киберфизической системы управления КАОПГ: А – абсорбер; РК – ректификационная колонна; И – испаритель;К – контроллер физической системы; Р – регулятор цифровой модели

В рамках концепции КФС необходимо решение задач разработки моделей управляемых процессов добычи газа на кустах газовых скважин, моделей управляемых процессов добычи в многопластовых системах с помощью одной скважины, моделей управляемого процесса ректификации многокомпонентных систем.

Киберфизический подход допускает также обработку больших данных, например, с помощью *Data mining* [13], [14], которые формируются в процессе длительной эксплуатации месторождения на основе измерений значительного количества параметров ТП. Для повышения эффективности управления ТП целесообразно применять концепцию многорежимного управления [15] в сочетании с информацией о режимах работы, хранящейся в базе данных. На ее основе устанавливается технологический режим добычи газа для каждой установки. Однако на сегодняшний день не существует системы, которая позволяла бы эффективно обрабатывать и выдавать решения с целью управления ГДК.

Математические модели технологических процессов газодобывающего комплекса. Рассмотрим некоторые модели ТП ГДК, описывающие их как объекты с распределенными параметрами. На основе разработанных ММ проведены компьютерные эксперименты с целью выявления влияния различных возмущающих воздействий на ТП.

1. Газоносные пласты являются основным элементом ГДК, так как именно они определяют его производительность. В связи с этим важным является прогнозирование отбора газа из пластов при возмущающих воздействиях, которые оказывают газосборные коллекторы и УКПГ через скважины.

Модель неустановившейся фильтрации упругой жидкости и газа в упругом пласте с учетом постоянства проницаемости и вязкости пластового флюида имеет вид [16]:

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r}\right)\kappa=\frac{\partial p}{\partial t},\ \kappa=\frac{k}{\mu(\beta_{\text{п}}+m\beta_{\text{г}})},$$
$$\beta_{\text{п}}=-\frac{1}{V}\frac{\partial V}{\partial p}=\frac{\partial m}{\partial p},\ \beta_{\text{г}}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial p}, \qquad (1)$$

где p – давление, r – расстояние от оси скважины до точки измерения; κ – коэффициент пьезопроводности, k – проницаемость, μ – вязкость, m – пористость, $\beta_{\text{П}}$, $\beta_{\text{Г}}$ – коэффициенты сжимаемости породы и газа соответственно, V – объем породы-коллектора, ρ – плотность газа. Здесь коэффициент κ характеризует скорость перераспределения пластового давления при неустановившейся фильтрации упругой жидкости в упругой пористой среде.

Начальные и граничные условия запишутся следующим образом [16]:

$$t = 0:\ p = p_0,\ 0 \le r \le R_к,$$
$$r = 0:\ -к\frac{\partial p}{\partial r} = q,\ t > 0,$$
$$r = R_к:\ p = P_к,$$

где p_0 – пластовое давление в начальный момент времени (на момент расчета), $R_К$ – радиус контура питания, $P_К$ – давление на контуре питания, q – дебит газа в работающей скважине.

Результаты компьютерного моделирования показали (рис. 3) [17], что за месяц эксплуатации скважины при расходе 15 000 м^3/ч давление забойное снизится до значения 5,85 МПа (при начальном 6,00 МПа).

Таким образом, разработанная ММ пласта при заданных значениях параметров, входящих в коэффициент пьезопроводности, и требуемом дебите газа на выходе из скважины, дает возможность прогнозировать поведение поля давления в однородном пласте.

2. При исследовании ТП абсорбционной осушки природного газа важным аспектом является наличие режима продольного перемешивания фаз. Необходимость анализа вызвана тем, что для ряда ТП продольное перемешивание потока в направлении его движения отрицательно сказывается на массообмене [18]. Такой анализ позволяет выявить влияние продольного перемешивания фаз на эффективность массообменного процесса в абсорбере.

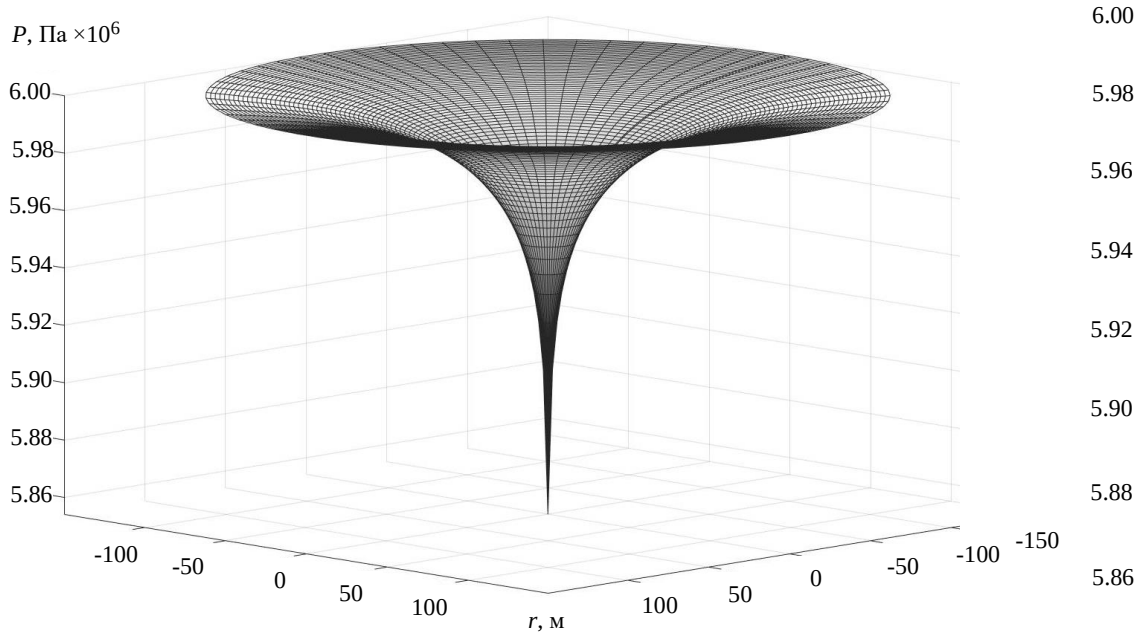


Рис. 3. Изменение давления забойного на конечное время расчета

Возникновение продольного перемешивания фаз в технологическом пространстве абсорберов обусловлено:

– различием скоростей движения жидкой и газовой фаз по высоте аппарата;
– возникновением турбулентной диффузии между жидкой и газовой фазами;
– уносом частиц жидкой фазы с потоком газовой фазы.

Примем основные допущения и ограничения для построения ММ:

– абсорбент в насадках колонны полностью перемешивается;
– массообменные процессы между газом и абсорбентом основываются на гидродинамическая модель полного вытеснения;
– скорости и концентрации газа и абсорбента одинаковы по сечению насадочной колонны;
– массопередача на насадке эквимолярная;

– абсорбент, проходя через насадку, не задерживается, что исключает образование зон простоя и его зависание в насадке;

– температурные профили газа и абсорбента по всей высоте абсорбера принимаются постоянными.

С учетом принятых допущений ММ массообменного процесса в режиме продольного перемешивания фаз записывается системой дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП):

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_{\text{цг}}}{\partial t} &= -\upsilon_{\text{г}}\left(\bar{G}_{\text{г}}, \theta_{\text{г}}, p_{\text{г}}\right)\left(\frac{\partial C_{\text{цг}}}{\partial z}\right) - R_{\text{г}}[C_{\text{цг}} - C^{\text{р}}_{\text{цг}}(C_{\text{ца}})] + D_{\text{г}}\left(\frac{\partial^2 C_{\text{цг}}}{\partial z^2}\right);\\ \frac{\partial C_{\text{ца}}}{\partial t} &= \upsilon_{za}\left(\frac{\partial C_{\text{ца}}}{\partial z}\right) + R_{\text{а}}[C_{\text{цг}} - C^{\text{р}}_{\text{цг}}(C_{\text{ца}})] + D_{\text{а}}\left(\frac{\partial^2 C_{\text{ца}}}{\partial z^2}\right),\end{aligned} \qquad (2)$$

где $C_{\text{ЦГ}}$, $C_{\text{ЦА}}$ – концентрации целевого компонента (ЦК) в газе и абсорбенте; υ_{za} – скорость абсорбента в направлении оси z; $\bar{G}_{\text{Г}}$ – расход газа; $\theta_{\text{Г}}$ – рабочая температура газа; $p_{\text{Г}}$ – рабочее давление газа; $R_{\text{Г}}$, $R_{\text{А}}$ – физико-технологические коэффициенты; $C^{\text{р}}_{\text{цг}}(C_{\text{цж}})$ – равновесная концентрация ЦК в газе зависящая от концентрации ЦК в абсорбенте; $D_{\text{Г}}$, $D_{\text{А}}$ – коэффициенты продольного перемешивания в газе и абсорбенте.

Модель (2) описывает массообменный процесс при $0 < z < l$, $t > 0$ где l – высота аппарата.

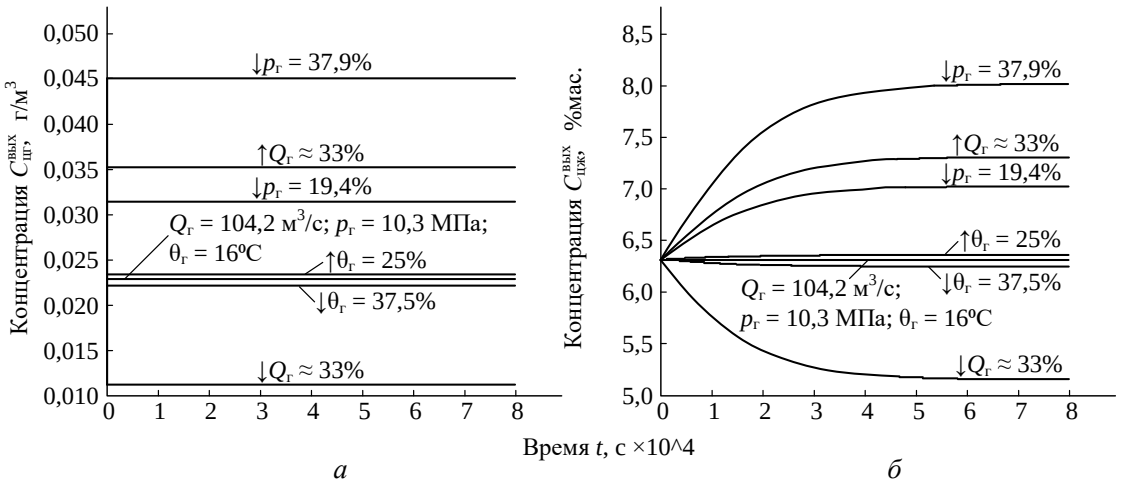
Граничные условия для (2):

$$\upsilon_{\text{г}}\left(\bar{G}_{\text{г}}, \theta_{\text{г}}, p_{\text{г}}\right) C^{\text{вх}}_{\text{цг}}(t) = \left[\upsilon_{\text{г}}\left(\bar{G}_{\text{г}}, \theta_{\text{г}}, p_{\text{г}}\right) C_{\text{цг}}(z,t) - D_{\text{г}}\frac{\partial C_{\text{цг}}(z,t)}{\partial z}\right]_{z=0}, \left.\frac{\partial C_{\text{цг}}(z,t)}{\partial z}\right|_{z=l} = 0.$$

$$\upsilon_{za} C^{\text{вх}}_{\text{ца}}(t) = \left[\upsilon_{za} C_{\text{ца}}(z,t) + D_{\text{а}}\frac{\partial C_{\text{ца}}(z,t)}{\partial z}\right]_{z=l}, \quad \left.\frac{\partial C_{\text{ца}}(z,t)}{\partial z}\right|_{z=0} = 0.$$

Начальные условия определяются исходными профилями концентраций ЦК по высоте аппарата $C_{\text{цг}}(z,t)\big|_{t=0} = C_{\text{цг}}(z)$; $C_{\text{ца}}(z,t)\big|_{t=0} = C_{\text{ца}}(z)$.

На основе (2) реализована компьютерная модель и проведен ряд экспериментальных исследований. Принято, что начальное равновесное состояние системы соответствует параметрам: $Q_{\text{Г}}$ = 104,2 м^3/с; $p_{\text{Г}}$ = 10,3 МПа и $\theta_{\text{Г}}$ = 16 °С. В процессе исследования скорость абсорбента $\upsilon_{\text{А}}$ и коэффициенты $R_{\text{Г}}$, $R_{\text{А}}$ приняты постоянными. Варьируемой величиной является скорость газа $\upsilon_{\text{Г}}$, зависящая от изменения расхода, давления и температуры газа. Возмущения – скачкообразные (максимально и минимально допустимые значения переменных процесса). Исследование проводилось в программной среде MATLAB/Simulink.

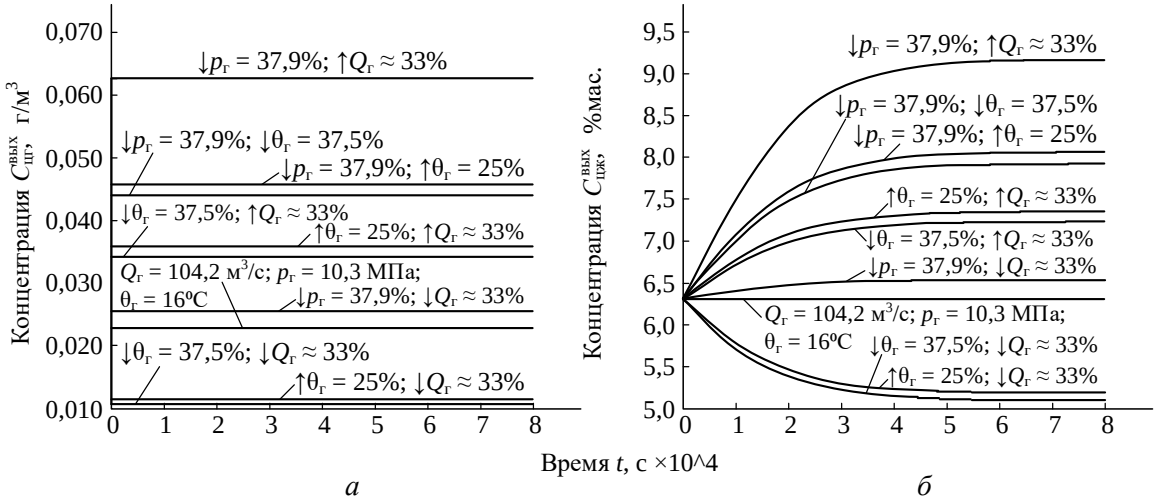


а *б*

Рис. 4. Графики переходных процессов по концентрациям ЦК в газе (*а*) и абсорбенте (*б*) при одном возмущении

В первой серии экспериментов проводилось исследование изменения концентраций ЦК в газе и абсорбенте при возмущениях по одному из параметров – расходу, давлению или температуре газа. Результаты моделирования представлены на рис. 4 (*а* – концентрация ЦК в газе; *б* – концентрация ЦК в абсорбенте). Графики переходных процессов показывают, что при увеличении переменных $Q_Г$ и $θ_Г$ и снижении переменной $p_Г$ концентрации ЦК в газе и абсорбенте увеличиваются. Снижение $Q_Г$ и температуры $θ_Г$ характеризуется снижением концентрация ЦК в газе и абсорбенте. Можно отметить, что изменения давления и расхода газа оказывают на содержание ЦК в газовой и жидкой фазах большее влияние, чем изменение температуры газа.

Вторая серия экспериментов проводилась при одновременном действии двух возмущений (в разных комбинациях).



а *б*

Рис. 5. Графики переходных процессов по концентрациям ЦК в газе (*а*) и жидкости (*б*) при комбинациях из двух возмущений

Графики переходных процессов представлены на рис. 5 (*а* – концентрация ЦК в газе; *б* – концентрация ЦК в жидкости). Переходные процессы, вызванные шестью комбинациями возмущающих параметров (снижение давления и увеличение расхода газа; снижение давления и температуры газа; снижение давления и увеличение температуры газа; снижение температуры и увеличение расхода газа; увеличение температуры и расхода газа; снижение давления и расхода газа), показывают увеличение концентрации ЦК в газе и абсорбенте. Две комбинации (снижение

температуры и расхода газа; увеличение температуры и снижение расхода газа) приводят к снижению концентрации ЦК в газе и абсорбенте.

Третья серия экспериментов выполнялась при одновременном изменении трех возмущающих параметров (в разных комбинациях). Представленные на рис. 6 переходные процессы показывают, что только снижение всех трех переменных (расхода, давления и температуры газа) вызывает снижение концентрации ЦК в газе и абсорбенте.

Проведенное исследование подтвердило адекватность ММ массообменного процесса в абсорбере с учетом продольного перемешивания реальному ТП. Значения, полученные при моделировании для содержания ЦК в абсорбенте, находятся в области значений, выявленных при наблюдении за ТП на реальном объекте. Для насыщенного абсорбента эти значения находятся в интервале 2,45…9,9 % мас.

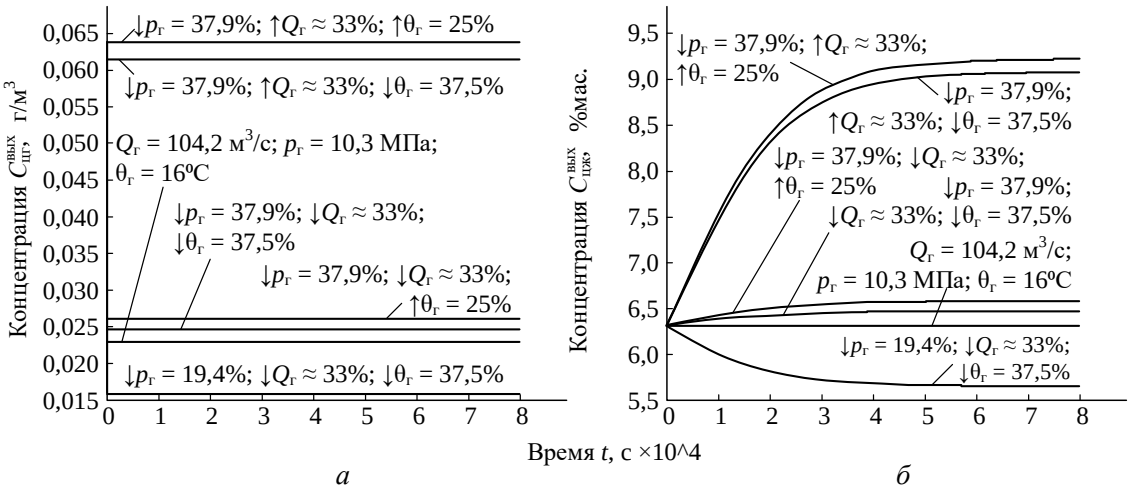


Рис. 6. Графики переходных процессов по концентрациям ЦК в газе (*а*) и жидкости (*б*) при комбинациях из трех возмущений

Концентрация ЦК в газе является целевой функцией для абсорбционной осушки природного газа. Анализ полученных при моделировании значений позволяет сделать заключение, что без разработки многорежимной и многомерной системы автоматического управления ТП не поддерживает заданное значение влагосодержания в газовой фазе.

Заключение.

В результате анализа поведения ГДК выявлены основные проблемы создания систем управления технологическими процессами. Определена целевая функция системы управления ГДК – обеспечение заданной производительности при условиях предупреждения гидратообразования. Основой разработки и эксплуатации систем управления ГДК предложено принять концепцию киберфизических систем. В рамках данной концепции необходима разработка цифровых (компьютерных) динамических моделей управляемых процессов добычи газа на кустах газовых скважин, добычи газа в многопластовых системах с помощью одной скважины, ректификации многокомпонентных систем и систем многорежимного управления.

На основе разработанных моделей пластовой фильтрационной системы и абсорбционной осушки проведена серия компьютерных экспериментов. Показано, что разработанная ММ пласта при определенном коэффициенте пьезопроводности и заданном дебите газа позволяет прогнозировать изменение поля давления в однородном пласте в целях предотвращения разрушения пластовой породы. Эксперименты на основе ММ массообменного процесса в абсорбере с учетом продольного перемешивания показали, что изменения давления и расхода газа оказывают на содержание ЦК в газовой и жидкой фазах большее влияние, чем изменение температуры газа. Анализ переходных процессов позволяет сделать заключение, что без

многорежимной и многомерной системы управления ТП ГДК невозможно реализовать целевые функции, обеспечивающие его функционирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный газовый промысел. Технические требования к технологическому оборудованию и объемам автоматизации при проектировании и обустройстве на принципах малолюдных технологий. СТО Газпром 2-2.1-1043-2016. М.: Газпромэкспо, 2016.

2. Васильев Ю.Н. Автоматизированная система управления разработкой газовых месторождений. М.: Недра, 1987.

3. Тараненко Б.Ф., Герман В.Т. Автоматическое управление газопромысловыми объектами. М.: Недра, 1976.

4. *Абрамкин С.Е., Душин С.Е.* Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.

5. *Ананенков А.Г., Ставкин Г.П., Талыбов Э.Г.о.* АСУ ТП промыслов газоконденсатного месторождения Крайнего Севера. М.: Недра-Бизнесцентр, 1998.

6. *Харазов В.Г.* Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: Профессия, 2009.

7. Автоматизация процессов газовой промышленности / М.А. Балавин, С.П. Продовиков, А.З. Шайхутдинов и др.; Под общ. ред. А.З. Шайхутдинова. СПб.: Наука, 2003.

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. *Еремин Н.А.* Современная разработка месторождений нефти и газа. Умная скважина. Интеллектуальный промысел. Виртуальная компания. М.: Недра-Бизнесцентр, 2008.

10. *Исмагилов Р.Н., Абрамкин С.Е., Душин С.Е.* Состояние и перспективы развития автоматизации установок комплексной подготовки газа на УНГКМ // Перспективные направления развития Уренгойского комплекса: сб. науч. тр. ООО «Газпром добыча Уренгой». М.: Недра, 2018. С. 271–281.

11. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.

12. *Вавилов А.А.* Структурный и параметрический синтез сложных систем. Л.: Изд-во ЛЭТИ, 1981.

13. *Майер-Шенбергер В., Кукьер К.* Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014.

14. *Селезнев К.* Проблемы анализа больших данных // Открытые системы. СУБД, 2012. № 7. С. 25-29.

15. *Филимонов Н.Б.* Концепция многорежимного регулирования // Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: Межвуз. сб. науч. тр. Новосибирск: НЭТИ, 1988. С. 88-92.

16. *Пономарева И.Н., Мордвинов В.А.* Подземная гидромеханика. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-т, 2009. 103 с.

17. *Абрамкин С.Е., Душин С.Е., Сирота Д.Д.* Разработка математической модели системы «пласт – газовая скважина» // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. Вып.3. С.10-15.

18. *Абрамкин С.Е., Душин С.Е.* Исследование модели процесса абсорбции с учетом продольного перемешивания // Сб. тр. IV Междунар. науч. конф. УОПИ-2015, Саратов: ИД «Райт-Экспо», 2015. Т.2. С. 5-11.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-440-446

Ильюшин Юрий Валерьевич

Санкт-Петербургский горный университет

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДОБЫЧИ ВЫСОКОПАРАФИНЕСТОЙ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. *Для добычи высокопарафинистых нефтей, характерны высокие температуры застывания, проявление тиксотропии, сопряженной с интенсивным образованием органических отложений преимущественно парафинового типа. В нефтепромысловой практике тепловые методы борьбы с образованием асфальтосмолопарафиновых отложений находят широкое распространение в силу своей надежности и простоты применения. В данной статье построена математическая модель движения высокопарафинистой нефти по колонне насосно-компрессорной трубы, рассмотрен способ формирования температурного поля с помощью импульсных секционных нагревателей, синтезирована система управления температурным полем, поставлен численный эксперимент на образце нефти.*

Ключевые слова: *анализ, наблюдение, температурное поле, высокопарафинистая нефть, асфальтосмолопарафиновые отложения.*

Description. *For the production of highly paraffinic oils, characterized by high pour points, the manifestation of thixotropy, coupled with the intensive formation of organic sediments mainly paraffin type. In the oil field practice, thermal methods of combating the formation of asphalt-resin-paraffin deposits are widely used because of their reliability and ease of use. In this article, a mathematical model of the motion of highly paraffinic oil along the tubing string is constructed, the method of forming the temperature field using pulsed sectional heaters is considered, the temperature field control system is synthesized, and a numerical experiment is run on an oil sample.*

Keywords: *analysis, observation, temperature field, high paraffin oil, asphalt, resin, paraffin deposits.*

Введение

Интенсивность образования органических отложений при добыче высокопарафинистых нефтей по длине колонны насосно-компрессорной трубы (НКТ) определяется следующими факторами: интенсивностью тепломассобмена потока при подъеме на поверхность, высоким содержанием парафинов в составе нефти и геотермическим градиентом. Интенсивность тепломассообмена потока со стенкой труб возрастает с увеличением дебита скважины и при разгазировании нефти. С увеличением градиента температуры вдоль радиуса подъемных труб отмечается практически линейное увеличение интенсивности образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) [6].

Таким образом, процесс образования АСПО при добыче нефти определяется многими факторами. Тщательное изучение роли этих факторов в конкретных условиях позволит подобрать и реализовать эффективные методы борьбы с образованием асфальтосмолопарафиновых отложений в нефтепромысловом оборудовании добывающих скважин.

С целью предупреждения образования органических отложений и их плавления в случае появления в нефтедобывающих скважинах авторами статьи разработана технология, основанная

на использовании нагревательных элементов, размещенных на наружной поверхности НКТ с точечным импульсным способом нагрева. Данный способ теплового воздействия при добыче высокопарафинистых нефтей обеспечивает поддержание необходимой температуры потока нефти по всему сечению колонны НКТ с заданной глубины до устья скважины выше температуры насыщения ее парафином.

Методика решения

Для устранения данной проблемы установим вдоль всей плоскости НКТ и труб транспортной системы небольшие импульсные секционные нагреватели. Для регулирования данной системы устройство управления должно создавать воздействия, на изменение температурного поля от заданного значения. Такого рода отклонения должны фиксироваться в определённых точках в определённое время. Тогда их можно будет зафиксировать. Таким образом, необходимо производить расчет места и времени включения нагревательных элементов.

Задача стабилизации температурного поля, свидеться, к удержанию температурных изменении T (x,t) в пределах $T_{зад}$. Эту функцию будут реализовывать импульсные нагревательные элементы.

Рассмотрим объект управления, описываемый следующей математической моделью:

$$T(0,r,t) = T(l,r,t) = 0;$$

$$T(x,R,t) = u(x,t);$$

$$\frac{\partial T(x,0,\tau)}{\partial r} = 0.$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right);$$

$$0 < r < R; \quad 0 < x < l;$$

Где $T(x,r,t)$ – температурное поле объекта управления; a^2 – заданный коэффициент температуропроводности материала объекта управления; R, l − заданные числа; $u(x,t)$ – управляющее воздействие, x, r − пространственные координаты объекта управления; t − время. Функцией выхода для данной математической модели будет функция $T(x,r,t)$, где r − заданное число из диапазона ($0<r<R$). Из граничных условий видно, что границы объекта имеют нулевую температуру, входное воздействие распространено по границе НКТ. Что необходимо для выполнения условия симметрии температурных полей.

Допустим, диаметр НКТ пренебрежимо мал. При таком допущении температура в произвольных точках изотропного НКТ можно считать одинаковой. Будем считать объект управления пространственно одномерным. Тогда распределение температурного поля по изотропному цилиндру можно описать с помощью, представляющей собой бесконечный ряд Фурье, функции Грина.

$$T(x,t,\xi,\tau) = \frac{2}{l}\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2(t-\tau)\right]\sin\frac{\pi n}{l}x\sin\frac{\pi n}{l}\xi$$

Где n – номер члена ряда Фурье; l– длина НКТ; t – время; x – точка (координата по оси X) расположения датчика температуры; ξ – точка (координата по оси X) расположения нагревательного элемента; τ – момент включения точечного источника, a^2 – заданный коэффициент температуропроводности материала объекта управления.

Таким образом, полученная формула позволяет производить расчет поведения температурного поля в произвольной точке НКТ в произвольный момент времени. Однако для исследования температурного поля с течением времени необходимо получить функцию начального нагрева.

Так как значение температуры есть сумма значений функции Грина в текущий момент времени и функции начального нагрева.

Таким образом, для анализа температурного поля необходимо применять формулу, учитывающую функцию начального нагрева:

$$T(x_j,t)=\sum_{i=1}^{d}\sum_{n=1}^{k}\frac{2}{l}\exp\left[-\left(\frac{\pi na}{l}\right)^2 t\right]\sin\frac{\pi n}{l}x_j\sin\frac{\pi n}{l}\xi_i+$$

$$+\sum_{p}\sum_{n=1}^{k}\frac{2}{l}\exp\left[-\left(\frac{\pi na}{l}\right)^2\left(t-\tau_p\right)\right]\sin\frac{\pi n}{l}x_j\sin\frac{\pi n}{l}\xi_{z(p)}$$

Моделируя систему управления с помощью данной функции, наблюдатель имеет возможность следить за распространением температурного поля в любой точке одномерного объекта управления в любой промежуток времени. Таким образом, полученная формула показывает поведение температурного поля с учетом времени работы системы. Данное уравнение моделируется в любом языке программирования и в любой программной среде.

Численный пример

Расширим функционал предложенной методики для двухмерного объекта описываемого следующей математической моделью

$$\frac{\partial T}{\partial t}=a^2\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right);$$

$$0<x<l_x;\ 0<y<l_y;\ 0<z<l_z.$$

Граничные и начальные условия объекта управления:

$$T(x,y,\tau)=U(x,y,\tau);\ \frac{\partial T(x,y,0,\tau)}{\partial r}=0;$$

$$T(x,0,\tau)=T(x,l_y,\tau)=T(0,y,\tau)=T(l_x,y,\tau)=0;$$

$$T(x,y,0)=0;$$

Значения температурного поля, определяющиеся с помощью функции Грина которая в двухмерном варианте примет вид:

$$G(x,y,\rho,\nu,t)=\frac{4}{l_1\cdot l_2}\cdot\sum_{k,m=1}^{\infty}\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x}{l_1}\right)\cdot\sin\left(\frac{m\cdot\pi\cdot y}{l_2}\right)\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\rho}{l_1}\right)\times$$

$$\times\sin\left(\frac{m\cdot\pi\cdot\nu}{l_2}\right)\cdot\exp\left[-a^2\pi^2\cdot t\cdot\left(\frac{k^2}{l_1^2}+\frac{m^2}{l_2^2}\right)\right]$$

Н данной функции координатами точек нагрева являться *x*, *y* геометрическими показателями объекта управления l_1, l_2,; количество членов ряда Фурье*k*, *m*; координаты температурного датчика *p*, *v*.

Для динамического отображения поведения теплового поля будем применять функцию:

$$T(x_j,y_j,t)=\sum_{i=1}^{d}\sum_{k,m=1}^{\infty}\frac{4}{l_1\cdot l_2}\exp\left[-a^2\pi^2\cdot t\cdot\left(\frac{k^2}{l_1^2}+\frac{m^2}{l_2^2}\right)\right]\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x_j}{l_1}\right)\times$$

$$\times\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\rho_i}{l_1}\right)\cdot\cdot\sin\left(\frac{m\cdot\pi\cdot y_j}{l_2}\right)\cdot\sin\left(\frac{m\cdot\pi\cdot\nu_i}{l_2}\right)+\sum_{p}\sum_{k,m=1}^{\infty}\frac{4}{l_1\cdot l_2}\times$$

$$\times\exp\left[-a^2\pi^2\cdot(t-\tau_p)\cdot\left(\frac{k^2}{l_1^2}+\frac{m^2}{l_2^2}\right)\right]\sin\left(\frac{m\cdot\pi\cdot y_j}{l_2}\right)\cdot\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot x_j}{l_1}\right)\times$$

$$\times\sin\left(\frac{k\cdot\pi\cdot\rho_{z(p)}}{l_1}\right)\cdot\sin\left(\frac{m\cdot\pi\cdot\nu_{z(p)}}{l_2}\right);$$

где количество импульсных элементов с релейным принципом управления будет обозначаться переменной – *d*, а его порядковый номер- *p=1,2,3….*; через переменную *z(p)*отобразим один из импульсных элементов с релейным принципом управления; τ_p – момент времени включения

источника под номером $z(p)$; l_1, l_2– пространственные координаты распределенного объекта управления;

Полученная функция начального нагрева способна определить поведение температурного поля с течением времени в любой точке объекта управления.

Для практического расчета возьмем нефть залежей Кыртаельского месторождения:

Таблица 1. Экспериментальные значения залежей Кыртаельского месторождения

Наименование параметра	**Принятое значение**
Пластовое давление, МПа	27,4 (-2492)
Пластовая температура, ºС	55,8 (-2492)
Давление насыщения, МПа	27,4
Газосодержание, $м^3/т$	
- при дифференциальном (ступенчатом) разгазировании, $м^3/т$	231,4
Плотность в условиях пласта, $кг/м^3$	651,0
Вязкость нефти в условиях пласта, мПа×с	1,07
Коэффициент объемной упругости, $1/МПа \times 10^{-4}$	16,3[1)]
Плотность нефтяного газа, $кг/м^3$, при 20ºС	
- при однократном (стандартном) разгазировании	1,006
- при дифференциальном (ступенчатом) разгазировании	0,906
Плотность дегазированной нефти, $кг/м^3$, при 20ºС	
- при однократном (стандартном) разгазировании	829,8
- при дифференциальном (ступенчатом) разгазировании	835,0

На рисунке 1 показана кристаллизация парафинов которая наступает при температуре 62 ºС.

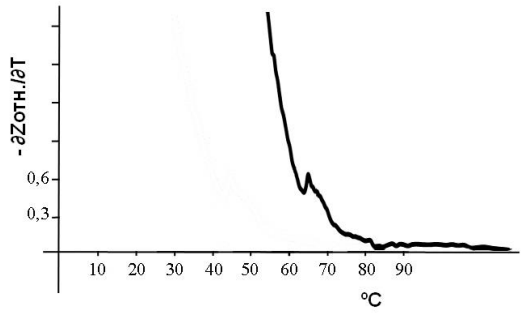


Рисунок 1. Зависимость механического сопротивления -∂Zонт./∂t от температуры образца нефти Соболиного месторождения

После добавления включении нагревательных элементов начало кристаллизации парафина смещено в зону низких температур на 10 ºС, что подтверждает влияние нагревательных элементов (см. рис. 2)

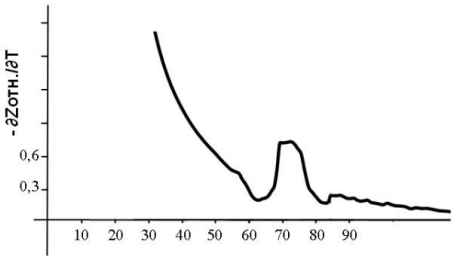


Рисунок 2. Зависимость отношения -∂Zотн./∂t (б) от температуры образца нефти Кыртаельского месторождения

Таким образом разработанные методики показывают реальный технический эффект от внедрения.

Обсуждение

В настоящее время развитие нефтяной отрасли в России и других странах характеризуется быстрым ростом объемов производства. При этом особое внимание уделяется обеспечению качества подготовки нефтепродуктов для его последующей транспортировки, а также надежности и эффективности функционирования технологического оборудования.

Вместе с тем, технологические процессы на технологическом оборудовании, протекающие под воздействием различных возмущающих факторов, имеют нестационарный характер и обуславливают необходимость разработки адекватных динамических математических моделей процессов кристаллизации парафина в сырой нефти. Это требует исследования указанных процессов как объектов с распределенными параметрами.

Поэтому настоящая работа, посвященная решению такой исследовательской задачи, представляется актуальной.

Основное внимание в работе уделено разработке комплекса математических моделей теплообменных процессов в системе НКТ и их программной реализации.

Научная новизна работы заключается в разработке концептуальной модели взаимосвязанных физических процессов технологических систем НКТ и математических моделей теплообменных процессов как систем с распределенными параметрами.

Обоснованность научных положений, выводов и достоверность результатов исследования подтверждаются корректным использованием математического аппарата, ограничений и допущений, близостью результатов исследования с данными натурных экспериментов.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в том, что они являются определенным вкладом в теорию описания и исследования технологических процессов в системе НКТ, учитывающих пространственную разнородность потоков нефти и нелинейности взаимосвязей его параметров.

Практическая ценность состоит в разработке методов, и технических решений направленных на предотвращение образования асфальтосмолопарафиновых отложений при различных внешних факторах, определяющих режимы функционирования, повышении эффективности технологического процесса добычи, поддержании заданного качества нефти в широком интервале изменения давления, температуры.

Заключение

Применение разработанной технологии теплового воздействия при добыче высокопарафинистой нефти обеспечивает стабильное поддержание необходимой температуры потока нефти по всему сечению колонны НКТ с заданной глубины до устья скважины выше температуры насыщения ее парафином. Предлагаемая технология позволит существенно повысить эффективность эксплуатации скважин при добыче высокопарафинистых нефтей за счет увеличения межочистного периода работы добывающих скважин.

Основными результатами работы являются:

• Предложена процедура стабилизации температурного поля на основе функции Грина. Данная методика заключается в реакции системы управления на отклоняющее значение температурного поля, вызванного импульсным источником с релейным принципом управления. В связи с синтезом системы с распределенными параметрами, синтез системы управления отличается от линейного пространственной привязанностью к объекту управления, пространственной распределенностью входных воздействий и учетом пространственного взаимодействия температурных полей [1-20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глущенко В.Н. Предупреждение и устранение асфальтеносмолопарафиновых отложений. Нефтепромысловая химия / В.Н. Глущенко, В.Н. Силин. - М.: Интерконтракт Наука, 2009. - 475 с.

2. Девликамов В.В., Хабибуллин З.А., Кабиров М.М. Аномальные нефти. – М.: Недра, 1975. – 168 с.

3. Ибрагимов Н.Г., Тронов В.П., Гуськова И.А. Теория и практика методов борьбы с органическими отложениями на поздней стадии разработки нефтяных месторождений. – 2010. – 240 с.

4. Рагулин В.В. Исследования свойств асфальтосмолопарафиновых отложений и разработка мероприятий по их удалению из нефтепромысловых коллекторов / В.В. Рагулин, Е.Ф. Смолянец, А.Г. Михайлов // Нефтепромысловое дело. – 2001. - №5. – С. 33-36.

5. Тронов В.П. Механизм образования смолопарафиновых отложений и борьба с ними. – М.: Недра, - 1970. – 192 с.

6. Хабибуллин З. А., Хусаинов З. М., Ланчаков Г. А. Борьба с парафиноотложениями в нефтедобыче //Уфа: УГНТУ. – 1992. – 105 с.

7. Gryazev MV, Kachurin NM, Vorobiev SA Mathematical models of aerogasdynamic and thermophysical processes in underground coal mining at various stages of field development // Journal of Mining Institute. 2017. P. 223. P. 99-108.

8. Ilyushin, Y., Pervukhin, D., Afanasieva, O., Klavdiev, A., & Kolesnichenko, S. (2014). The Methods of the Synthesis of the Nonlinear Regulators for the Distributed One-Dimension Control Objects. Modern Applied Science 9 (2), 42-61. Retrieved January 22, 2014, from http://dx.doi.org/10.5539/mas.v9n2p42

9. Galkin A.F. Integrated use of heat-transfer workings // Journal of Mining Institute. 2017. T 224, P. 209-2014.

10. Ilyushin Y., Afanasieva O., Synthesis of a distributed control system // International Journal of Control Theory and Applications, Volume 9, Issue No. 30, 2016, pp. 41-60

11. Ilyushin, Y., Pervukhin, D., Afanasieva, O., Klavdiev, A., & Kolesnichenko, S. (2014). Designing of Distributed Control System with Pulse Control. Middle-East Journal of Scientific Research, 21(3), 436-439. Retrieved January 22, 2014, from http://dx.doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2014.21.03.21433

12. Ilyushin Y. Mokeev A. Technical Realization of the Task of Controlling the Temperature Field of a Tunnel Furnace of a Conveyor Type // International Journal of Applied Engineering Research Volume 12, Number 8 (2017) pp. 1500-1510Ilyushin, Y. (2011). Designing of temperature field control system of tunnel kilns of conveyor type. Scientific-Technical News of S.Pt.SPI, 3(126), 67-72.

13. Kolesnikov, A. (2009). Nonlinear Oscillations Control. Energy Invariants. Journal of Computer and Systems Sciences International, 48(2), 185-198. Retrieved January 22, 2014, from http://dx.doi.org/10.1134/S1064230709020038

14. Kolesnikov, A., Zarembo, Ya., & Zarembo, V. (2007). Discharge of a Copper-Magnesium Galvanic Cell in the Presence of a Weak Electromagnetic Field. Russian Journal of

Physical Chemistry A, 81(7), 1178-1180. Retrieved January 22, 2014, from http://dx.doi.org/10.1134/s003602440707031x.

15. Kolesnikov, A., Zarembo, Ya., Puchkov, L., & Zarembo, V. (2007). Zinc Electrochemical Reduction on a Steel Cathode in a Weak Electromagnetic Field. Russian Journal of Physical Chemistry A, 81(10), 1715-1717. Retrieved January 22, 2014, from http://dx.doi.org/10.1134/s0036024407100330

16. Pershin, I. (2007). Analysis and synthesis of systems with distributed parameters. Pyatigorsk: RIA-KMV.

17. Pleshivtseva, Y., & Rapoport, E. (2009). The Successive Parameterization Method of Control Actions in Boundary Value Optimal Control Problems for Distributed Parameter Systems. Journal of Computer and Systems Sciences International, 48(3), 351-362. Retrieved January 22, 2014, from http://dx.doi.org/10.1134/S1064230709030034

18. Rapoport, E. (1996). Alternance Properties of Optimal Solutions and Computational Algorithms in Problems of Semi-Infinite Optimization of Controlled Systems. Journal of Computer and Systems Sciences International, 35(4), 581-591.

19. Rapoport, E. (2006). Structural Parametric Synthesis of Automatic Control Systems with Distributed Parameters. Journal of Computer and Systems Sciences International, 45(4), 553-566. Retrieved January 22, 2014, from http://dx.doi.org/10.1134/S1064230706040071

20. Rapoport, E., & Pleshivtseva, Y. (2010). Combined Optimization of Metal Hot Forming Line with Induction Pre-Heating. Proceedings of the IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers, Israel, Eilat.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-447-452

Антропова Вероника Валентиновна, Трушников Дмитрий Александрович

Санкт-Петербургский горный университет

СОЗДАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПЛАСТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. *Название доклада определяется следующим образом «Создание пространственнораспределенных математических моделей нефтегазоносных пластов сложной формы».*

Доклад посвящен созданию пространственнораспределенной математической модели нефтегазоносных пластов сложной формы. Рассматривается способ получения данных о пласте с помощью датчиков DS18B20, которые подключаются к плате Arduino UNO. Вывод модели, построенной на основе данных, полученных с датчиков, осуществляется в виде графика.

Ключевые слова: *Математические модели, Arduino, нефтегазоносные пласты, датчики температуры, пласты сложной формы, получение информации с датчиков.*

Description. *The title of the report is defined as follows: "Creation of spatially distributed mathematical models of oil and gas bearing formations of complex shape".*

The report is devoted to the creation of a spatially distributed mathematical model of oil and gas reservoirs of complex shape. A method for obtaining reservoir data using DS18B20 sensors that are connected to an Arduino UNO board is being considered. The output of the model based on the data obtained from the sensors is carried out in the form of a graph

Keywords: *Mathematical models, Arduino, oil and gas reservoirs, temperature sensors, formations of complex shape, obtaining information from sensors.*

Введение

Нефть - это природная горючая маслянистая жидкость, которая состоит из смеси углеводородов самого разнообразного строения. Нефть и горючий газ встречаются в земных недрах как вместе, так и раздельно.

Природный горючий газ состоит из газообразный углеводородов - метана, этана, пропана. добыча переработка нефть газ.

Нефть и газ встречаются в природе в виде скоплений в пористых породах, которые называются коллекторами. Хорошим коллектором считает пласт песчаника, находящийся среди непроницаемых пород, таких как глины или глинистого сланца. Наиболее благоприятные условия для образования месторождений нефти и газа возникают в тех случаях, когда пласт песчаника изогнут в складку, обращенную сводом кверху. При этом верхняя часть такого купола бывает заполнена газом, ниже располагается нефть, а еще ниже - вода. Пласты, в которых имеются скопления нефти или газа называются залежами нефти или газа. Совокупность залежей нефти и газа, сконцентрированных в недрах на одной и той же территории и подчиненных в процессе образования одной тектонической структуре называется нефтяным или газовым месторождением. К настоящему времени на территории России открыто несколько десятков нефтяных и газовых месторождений. К ним относятся Самотлорское месторождение, Ромашкинское, Приобское, Лянторское, Федоровское, Мамонтовское, Арланское, Ванкорское, Русское, Туймазинское и другие. В связи с огромным потенциалом, обеспеченным большим количеством месторождений, нефтегазовая отрасль имеет огромное значение для России.

В России нефтяная и газовая промышленность являются ведущими отраслями промышленности. Перед нефтегазодобывающей отраслью стоят большие и ответственные задачи. Существует множество нефтегазовых компаний, таких как публичное акционерное общество «Газпром нефть», публичное акционерное общество «ЛУКОЙЛ», ОАО «Сургутнефтегаз», ОАО «НГК «Славнефть», публичное акционерное общество «НК «Роснефть», ОАО «НОВАТЭК», ОАО «Томскнефть» и этот список можно продолжать еще долго. Однозначно можно сказать о том, что нефтяная и газовая промышленность в России широко развиты. В Российской Федерации изучение и освоение первичных энергетических ресурсов, таких как нефть и газ, всегда будет актуально.

1. Создание пространственнораспределенных математических моделей нефтегазоносных пластов сложной формы

Для изучения нефтегазоносных пластов необходима некоторая модель, которая позволит нам получать необходимую информацию о пласте. Для этого и необходимо построение математической модели. «Получить хорошую модель пласта можно лишь при учете технических, физических и математических аспектов проблемы, которые тесно переплетаются между собой. <…>

Моделирование – это процесс, при котором специалист использует модель для получения информации, на базе которой он может принять разумное решение. Моделирование не заменяет изучение объекта, но может помочь понять основные взаимосвязи происходящих в нем процессов.

При исследовании сложное реальное явление заменяется некоторой упрощенной копией или схемой, иногда такая копия служит лишь только для того чтобы запомнить и при следующей встрече узнать нужное явление. Иногда построенная схема отражает какие - то существенные черты, позволяет разобраться в механизме явления, дает возможность предсказать его изменение. Одному и тому же явлению могут соответствовать разные модели. Задача исследователя - предсказывать характер явления и ход процесса. Иногда, бывает, что объект доступен, но эксперименты с ним дорогостоящи или привести к серьезным экологическим последствиям. Знания о таких процессах получают с помощью моделей.

К математической модели предъявляются следующие требования:

– Универсальность - характеризует полноту отображения моделью изучаемых свойств реального объекта;

– Адекватность - способность отражать нужные свойства объекта с погрешностью не выше заданной;

– Точность - оценивается степенью совпадения значений характеристик реального объекта и значения этих характеристик полученных с помощью моделей;

– Экономичность - определяется затратами ресурсов ЭВМ памяти и времени на ее реализацию и эксплуатацию.

– Основные этапы математического моделирования:

– Построение модели. На этом этапе задается некоторый «нематематический» объект — явление природы, конструкция, экономический план, производственный процесс и т. д. При этом, как правило, четкое описание ситуации затруднено. Сначала выявляются основные особенности явления и связи между ними на качественном уровне. Затем найденные качественные зависимости формулируются на языке математики, то есть строится математическая модель. Это самая трудная стадия моделирования;

– Решение математической задачи, к которой приводит модель. На этом этапе большое внимание уделяется разработке алгоритмов и численных методов решения задачи на ЭВМ, при помощи которых результат может быть найден с необходимой точностью и за допустимое время;

– Интерпретация полученных следствий из математической модели. Следствия, выведенные из модели на языке математики, интерпретируются на языке, принятом в данной области;

– Проверка адекватности модели. На этом этапе выясняется, согласуются ли результаты эксперимента с теоретическими следствиями из модели в пределах определенной точности;

– Модификация модели. На этом этапе происходит либо усложнение модели, чтобы она была более адекватной действительности, либо ее упрощение ради достижения практически приемлемого решения.

Моделирование нефтяных пластов — инструмент, позволяющий специалисту глубже изучить механизм нефтеотдачи. При правильном его использовании можно получить ценнейшие результаты, но вместе с тем моделирование не может заменить инженерную деятельность, очень важную при проведении всех промысловых исследований (Коутс, 1969; Стэггс и Хербек, 1971). К тому же не для всех пластов требуются сложные модели, во многих случаях на поставленные вопросы можно получить ответ при обычных промысловых исследованиях или исследованиях на очень простых машинных моделях. Машинные модели с большой легкостью генерируют числа. Однако в большинстве случаев правильно проинтерпретировать эти числа могут только лица, хорошо понимающие математическую, численную и машинную модели.» [7]

Известно, что месторождение можно разработать только один раз, поэтому любая ошибка в этом процессе неисправима. Однако, применяя метод моделирования, можно выполнить эту процедуру несколько раз и изучить различные варианты. При использовании моделирования в качестве средства управления достигается более эффективное использование пластовой энергии, что принципе приводит к увеличению конечной нефтеотдачи и к более экономичной разработке месторождения.

Значительным преимуществом моделирования является то, что использование этого метода позволяет объединить все данные, присущие пласту, в одну компактную систему, исследование которой без этого метода невозможно.

Создание универсальной комплексной математической модели нефтегазоносных пластов сможет быть основой для дальнейшего изучения и освоения, как пласта отдельного месторождения, так и для общего изучения всех месторождений сразу. Модели также широко применяют для изучения механики движения флюидов в пористой среде.

Цель данной работы заключается в создании математической модели нефтегазоносных пластов сложной формы. При выполнении работы необходимо решить следующие задачи:

- определить параметры, которые будут учитываться при построении модели;
- определить способ сбора необходимых данных;
- определить метод формирования модели;
- представить полученную информация в удобной и понятной форме.

Понятие «математическая модель» означает то, что моделируемая физическая система описывается соответствующими математическими уравнениями. При этом почти всегда для того, чтобы сделать задачу разрешимой, требуются некоторые допущения, необходимые с практической точки зрения.

Для начала такого крупного доклада автор предлагает построение математической модели на основе данных о температуре, полученных с датчиков. Это будет являться стартом, начальной ступенью создания математической модели. Позже, после изучения и построения модели построенной на основе изменения одного параметра, можно будет подключить целую систему датчиков. Например, датчиков давления, движения, влажности и так далее.

---

[7] Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. — Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004, 15 стр.

Датчики будут подключаться к плате, через которую информация будет передаваться на ЭВМ. Примером таких плат являются Мастер Кит и Arduino.В данном исследовании выбор автора пал на плату Arduino Uno.

Датчиков температуры Arduino также достаточное количество. Вот некоторые из них: DHT11, DS18B20, LMT01, TMP35, TMP36, TMP37. Автор будет использовать датчик температуры DS18B20. Это цифровой датчик, обладающий множеством полезных функций. По сути, DS18B20 является целым микроконтроллером, который может сигнализировать о выходе температуры за установленные границы (возможно самостоятельно устанавливать и менять эти границы), хранить значение измерений, менять точность измерений, способ взаимодействия с контроллером и многое другое. Для начала будем считывать данные лишь с одного датчика.

Осуществив подключение датчика к плате и последней к ЭВМ, необходимо прописать программный код, или скетч. Скетч является программой, написанной для платформы Arduino и имеющая определенную структуру. Программа выводит нам на экран значение температуры в каждый момент времени с указанным нами интервалом. В случае, представленном в исследовании, данные считываются с датчика каждую секунду. Пример работы программы представлен на рисунке 1.

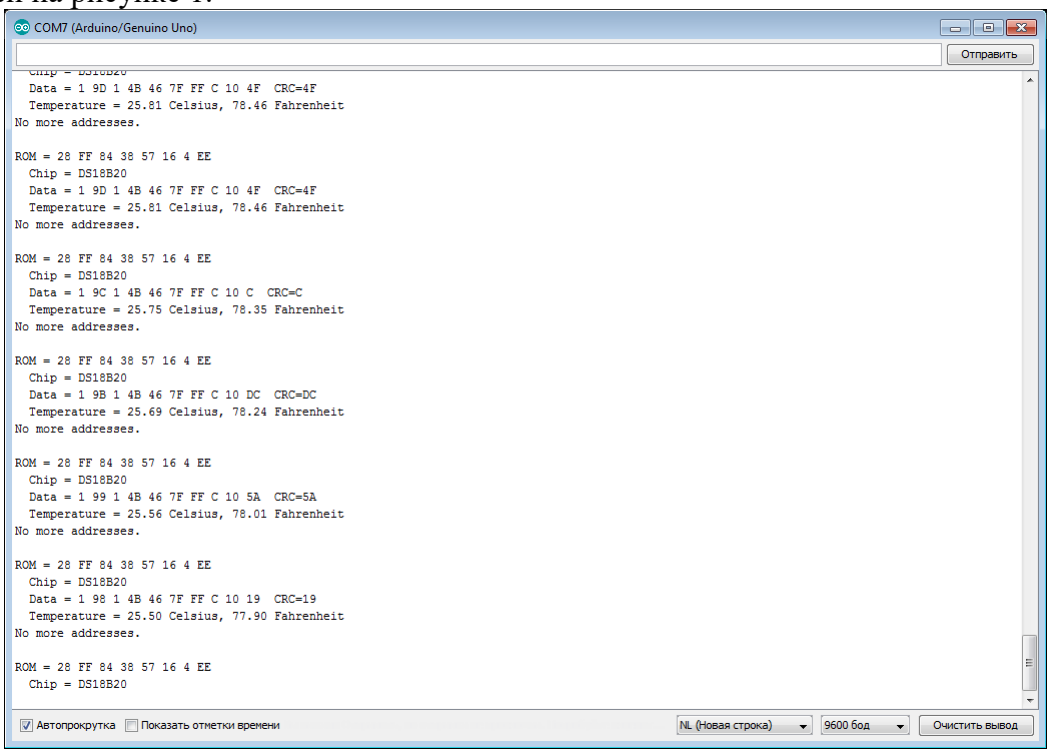


Рисунок 1 - Пример работы программы в среде Arduino

Так как с помощью программной среды Arduino возможен вывод данных на экран лишь в письменной форме, как это видно на рисунке 1. Для наглядности и удобства анализа полученных данных, осуществим «переадресацию» данных из среды Arduino в программную среду Delphi. На основе получаемых каждую секунду данных будет строиться график изменения температуры. График изменения температуры представлен на рисунке 2.

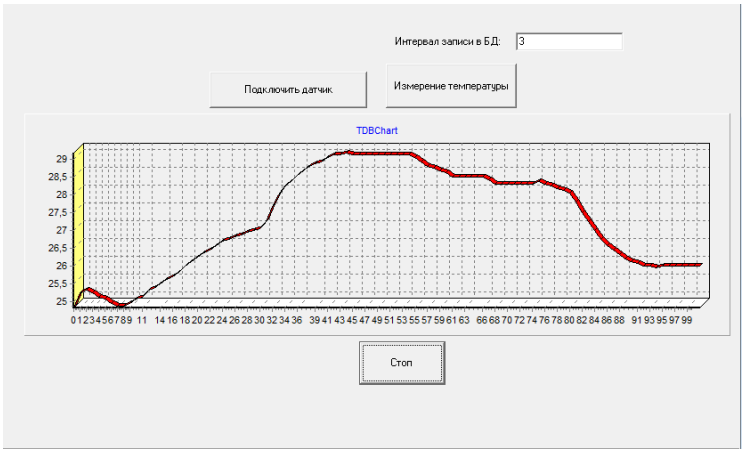


Рисунок 2 - Пример работы программы. Вывод графика

Так же для более удобного исследования полученных данных произведем связь между программной средой Delphi и реляционной системной управления базами данных (СУБД) Access. Еще одним плюсом данной связи является то, что Access без проблемно работает с большинством современных программ, с помощью которых можно анализировать огромный поток информации, например Apache Hadoop. Использование этой возможности позволит не переписывать вручную данные в сторонние программы, если это будет необходимо, что в разы сократит время работы над каким-либо проектом или исследованием. Пример вывода информации в СУБД представлен на рисунке 3.

Вывод температуры

№	Время	Температура
1	0	25
2	3	25,3
3	6	25,1
4	9	25,3
5	12	25,4
6	15	25,5
7	18	25,95
8	21	26,25
9	24	26,51
10	27	26,8
11	30	27,1
12	33	28,1
13	36	28,5
14	39	28,7
15	42	28,9
16	45	28,9
17	48	28,9
18	51	28,9

Рисунок 3 - Пример вывода информации в СУБД Access. Интервал записи 3 секунды

Итак, соорудив «аквариум», в котором располагаются различные породы, полезные ископаемые и в том числе нефть и газ, можно создать условный образец нефтегазоносного пласта. Протестировав работу датчиков, можно говорить о том, что возможно построение математической модели на основе полученных данных. Каждый датчик будет отвечать за определенную точку в пласте, следовательно подключив некоторую группу датчиков, возможно получение 3D графика изменения температуры. Данную модель можно усовершенствовать. Это лишь начальный этап, который показывает, каким образом можно построить математическую модель, используя датчики.

Заключение

Пространственнораспределенное моделирование нефтегазоносных пластов сложной формы – это важный аспект не только для наглядности в изучении объекта, но и для дальнейшего создания новых принципов получения информации. Примером такого нового принципа получения информации может послужить получение данных о различных параметрах

(температуре, давлении и т.д.) на основе соответствующих датчиков, которые в свою очередь подключаются к плате Arduino UNO.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. — Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004, 416 стр.

2. Бегимов И., Бутковский А.Г., Рожанский В.Я. Моделирование сложных распределенных систем на основе структурной теории. Ч. I. // Автоматика и телемеханика. — 1981, № 11. — С. 168 — 181.

3. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. — М.: Наука, 1979. — 224 с.

4. Ильюшин Ю. В. Методика синтеза нелинейных регуляторов для распределенного объекта управления. // Научное обозрение. 2012. №5. – С. 14- 17.

5. Першин И. М. «Анализ и синтез систем с распределёнными параметрами» – Пятигорск, 2004, -212 с.

6. Рапопорт Э.Я. «Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами» - Москва, Высшая школа, 2005, -292с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-453-460

Першин Иван Митрофанович (1), Кухарова Татьяна Валерьевна (2),
Папуш Елена Гавриловна (1), Спивак Алина Олеговна (3)

1. Северо-Кавказский федеральный университет
2. Санкт-Петербурский горный университет
3. Южный федеральный университет

ПОСТРОЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ АППРОКСИМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ЖЕЛЕЗНОВОДСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Аннотация. *Данные геологических исследований свидетельствуют о том, что ряд месторождений Кавказских Минеральных Вод характеризуются сложной конфигурацией водоносных пластов. Целью данной работы является построение распределённой аппроксимационной модели для гидролитосферных процессов в системах с криволинейными границами на основе динамических характеристик объекта управления.*

Ключевые слова: *гидролитосферный процесс, сложная конфигурация границ, аппроксимационная модель, нестандартные распределенные звенья.*

Abstract. *The data of geological studies indicate that a number of deposits of the Caucasian Mineral Waters are characterized by a complex configuration of aquifers. The purpose of this work is to build a distributed approximation model for hydrolithospheric processes in systems with curvilinear boundaries based on the dynamic characteristics of the control object.*

Keywords: *hydrolithospheric process, complex configuration of boundaries, approximation model, non-standard distributed links.*

1. Описание объекта. Традиционно при анализе гидролитосферных процессов водоупорные пласты считаются расположенными горизонтально, т.к. это упрощает составление математической модели. Считается, что погрешность расчётов при подобном допущении не превышает допустимую. Однако данные геологических исследований свидетельствуют о том, что ряд месторождений Кавказских Минеральных Вод, в том числе Кисловодское и Железноводское месторождения, характеризуются сложной конфигурацией водоносных пластов.

Методика определения динамических характеристик объекта управления представлена на примере Железноводского месторождения минеральных вод, расположенного на восточном склоне горы Бештау. Особенностью рассматриваемого месторождения является сложная конфигурация водоносных пластов. Сверху водоносные горизонты ограничены водоупором мощностью более 200 м. При составлении математической модели будем полагать, что грунтовые воды не оказывают влияния на водоносные пласты. Рассматриваемое месторождение состоит и двух водоносных пластов, разделенных водоупором. Датско-зеландский (эльбурганский) водоносный горизонт представлен мергелями с прослоями известняков и песчаников, верхнемеловой водоносный горизонт представлен известняками с прослоями мергелей и песчаников, что обуславливает различие их физических характеристик.

Схема месторождения приведена на рисунке 1. Добыча минеральной воды осуществляется тремя добывающими скважинами в нижнем водоносном горизонте. Измерение уровня пластового давления осуществляется с помощью трёх контрольных скважин.

При моделировании объекта контроля использованы геометрические и физические параметры объекта, полученные в результате геологических исследований месторождения [1]. Геометрические параметры приведены в таблице 1.

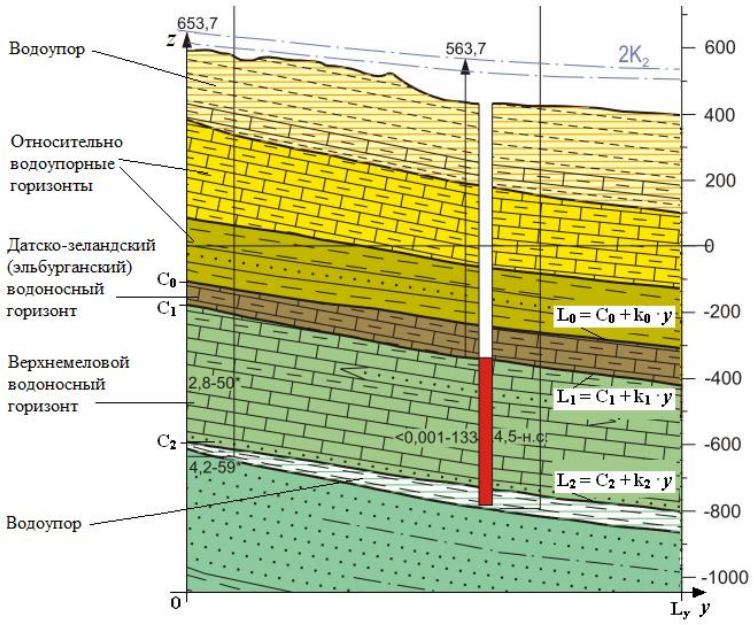


Рисунок 1 – Схема Железноводского месторождения минеральных вод

Таблица 1 – Геометрические характеристики объекта управления

Геометрические параметры, м					Коэффициенты линейных уравнений, характеризующих границы водоносных пластов		
L_x	L_y	C_0	C_1	C_2	k_0	k_1	k_2
360,0	1500,0	-108,3	-177,2	-594,3	-0,133	-0,162	-0,143

2 Математическая модель объекта управления

Целью исследования является определение параметров нестандартного распределённого звена, описывающего динамические характеристики объекта управления.

При описании водоупорных слоев и границы водоносных горизонтов для математической модели мы аппроксимируем их в виде прямых линий $L_i(y)$, $(i=\overline{0,2})$.

В этом случае мы предполагаем, что характерный уклон водоупорных слоев для $0 < x < L_x$ не зависит от координаты x. Математическая модель гидролитосферных процессов рассматриваемого месторождения может быть записана в виде уравнения в частных производных [2-5]:

Верхний водоносный пласт

$$\frac{\partial h_1(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{1,x}}{\eta_1}\cdot\frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + \frac{k_{1,y}}{\eta_1}\cdot\frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + \frac{k_{1,z}}{\eta_1}\frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial z_1^{\,2}}; \quad (1)$$

$$0 < x < L_x;$$
$$0 < y < L_y; \quad (2)$$
$$L_0(y) < z < L_1(y)$$

Для водоносных горизонтов необходимо учитывать коэффициенты фильтрации по пространственным координатам, а также коэффициенты упругоемкости пластов.

Нижний водоносный пласт

$$\frac{\partial H_2(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{k_{2,x}}{\eta_2} \cdot \frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} +$$
$$+ \frac{k_{2,y}}{\eta_2} \cdot \frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + \frac{k_{2,z}}{\eta_2} \frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial z_2^{\,2}} + \quad (3)$$
$$+ q(y_j,\tau) \cdot \delta(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j});$$
$$0 < x < L_x; \quad (4)$$
$$0 < y < L_y;$$
$$L_1(y) < z < L_2(y)$$

где: h_1 – напор в верхнем водоносном горизонте, м;
H_2 – напор в изучаемом водоносном пласте, м;
k_{ix}, k_{iy}, k_{iz} – коэффициенты фильтрации, м/сут, по пространственным координатам в верхнем (i = 1) и нижнем (i = 2) водоносных горизонтах;
η_i – коэффициенты упругоемкости верхнего (i = 1) и нижнего (i = 2) водоносных горизонтов, м$^{-1}$;
$q(y_j,\tau)$ – понижение напора, вызванное воздействием j-ой добывающей скважины, м; в рассматриваемом случае j =3..5, а входное воздействие (дебит добывающих скважин) $Q_j(\tau)$ = 0,00083· $q(y_j,\tau)$ [6-9];
$\delta(x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j})$ – функция, равная единице, если $x = x_{0,j}$, $y = y_{0,j}$, $z = z_{0,j}$, и равная нулю в других случаях; в рассматриваемом случае ($x_{0,1}$=120 м., $x_{0,2}$=180 м, $x_{0,3}$=240 м, $y_{0,j}$=L*=1050 м, $z_{0,j}$= -600 м);
x, y, z – пространственные координаты;
τ – время.
j – номер добывающей скважины, j = 1..3.

Граничные условия между рассматриваемыми слоями задаются в следующем виде (условия Дарси):

$$h_1(x,y,L_1(y),\tau_i) = h_1(x,y,L_1(y),\tau_{i-1}) +$$
$$+ b_1 \cdot (H_2(x,y,L_1(y),\tau_{i-1}) - h_1(x,y,L_1(y),\tau_{i-1})), \quad (5)$$
$$H_2(x,y,L_1(y),\tau_i) = H_2(x,y,L_1(y),\tau_{i-1} -$$
$$- b_1 \cdot (H_2(x,y,L_1(y),\tau_{i-1}) - h_1(x,y,L_1(y),\tau_{i-1})), \quad (6)$$
$$0 < x < L_x; \quad (7)$$
$$0 < y < L_y;$$

Нижняя граница нижнего водоносного пласта

$$\frac{\partial H_2(x,y,L_2(y),\tau)}{\partial z} = 0, \quad (8)$$
$$0 < x < L_x; \quad (9)$$
$$0 < y < L_y;$$

Боковые грани

$$h_1(x,0,z,\tau) = z - C_0, \quad (10)$$
$$0 < x < L_x;$$
$$C_0 < z < C_1; \quad (11)$$
$$h_1(x,L_y,z,\tau) = z - C_0 + k_0 \cdot L_y; \quad (12)$$
$$0 < x < L_x; \quad (13)$$
$$C_0 + k_0 \cdot L_y < z < C_1 + k_1 \cdot L_y;$$

$$H_2(x,0,z,\tau) = (C_1 + k_1 \cdot L^*) + (z - C_1); \quad (14)$$

$$H_2(x,L_y,z,\tau) = C_1 + (z - (C_1 + k_1 \cdot L_y)); \quad (15)$$

$$0 < x < L_x;$$

$$(C_1 + k_1 \cdot L_y) < z < (C_2 + k_2 \cdot L_y). \quad (16)$$

3 Определение динамических характеристик объекта управления

Физические параметры, используемые при моделировании объекта управления, были заданы следующими значениями: коэффициент упругоемкости для верхнего водоносного горизонта η_1 = 0.00043 м$^{-1}$, для нижнего η_2 = 0,00058 м$^{-1}$, коэффициенты гидравлической проводимости по соответствующим координатам: $k_{1,x}$ = 0,198 м/сут, $k_{1,y}$ = 0,196 м/сут, $k_{1,z}$ = 0,148 м/сут, $k_{2,x}$ = 0,146 м/сут, $k_{2,y}$ = 0,148 м/сут, $k_{2,z}$ = 0,024 м/сут, параметр утечки b_1 = 0,000035 сут$^{-1}$. Начальное состояние невозмущенных пластов формируется в соответствии с граничными условиями. Начальное значение уровня изучаемого водоносного пласта при y = 0 равно 653,7 м, в точках расположения добывающих скважин 563,7 м.

Входное воздействие на распределенный объект управления сформировано в виде пространственных мод [10-13] .

В соответствии с граничными условиями пространственные моды записываются в виде $Q_\gamma = A_j \cdot \sin(\psi_j \cdot x_\gamma)$, $\psi_j = \pi \cdot j / L_x$, ($\gamma$ = 3,4,5), $x_1 = 2 \cdot \Delta x$, $x_1 = 3 \cdot \Delta x$, $x_1 = 4 \cdot \Delta x$. Полагаем, что $G_j = \psi_j^2$, j=1…3. Понятие обобщенной координаты G, которая содержит весь дискретный спектр G_j, введено в работах [14-16]. Структурные схемы для аппроксимирующих звеньев в случае распределённых объектов описаны в [17]. Показано, что рассмотренные аппроксимирующие звенья наиболее полно описывают динамические характеристики в случае распределённых объектов. Для гидролитосферных процессов аппроксимирующее звено записывается в следующем виде [9, 17]:

$$W(G,s) = \frac{K}{\beta(G,s)+1} \exp\left(-\beta(G,s) \cdot \Delta z\right), \quad (17)$$

$$\beta = \left(\frac{s}{a^*} + G\right)^{0.5}, \quad (18)$$

где: s – оператор Лапласа;

K, Δz, a^* – параметры, значения которых определяются с помощью экспериментальных исследований и численного моделирования.

С целью определения параметров аппроксимирующего звена запишем дискретную модель гидролитосферных процессов для рассматриваемого месторождения. Мы выбрали две пространственные моды, которые заданы в виде:

первая мода $Q_\gamma = 0.0001157 \cdot \sin(\psi_1 \cdot x_\gamma)$, $\psi_1 = \pi \cdot 1 / L_x$, ($\gamma$ = 3,4,5);

вторая мода $Q_\gamma = 0.0001157 \cdot \sin(\psi_2 \cdot x_\gamma)$, $\psi_2 = \pi \cdot 2 / L_x$, ($\gamma$ = 3,4,5).

Динамическое входное воздействие может быть представлено в виде:

$$Q_\gamma = 0.0001157 \cdot \sin(\psi_1 \cdot x_\gamma) \cdot \sin(0{,}00002 \cdot \tau). \quad (19)$$

По результатам численного моделирования определили реакцию объекта на различные входные воздействия и построили графики. Реакция объекта на первую пространственную моду представлена на рисунках 2,3, реакция на вторую пространственную моду представлена на рисунках 4,5, реакция объекта на динамическое входное воздействие представлена на рисунке 6.

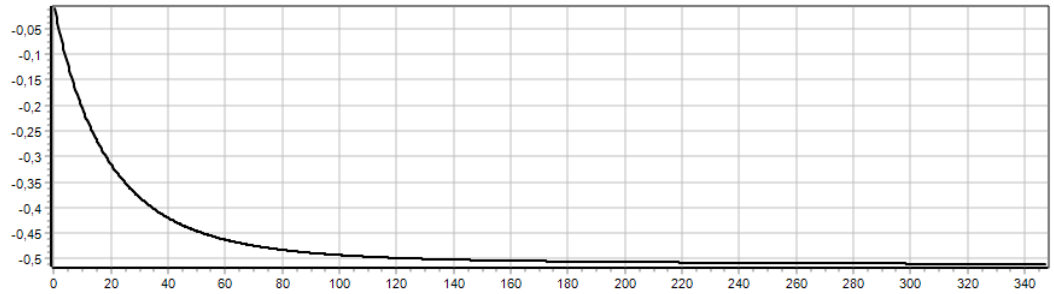


Рисунок 2 – Динамика понижения напора в первой добывающей скважине при подаче на вход первой пространственной моды

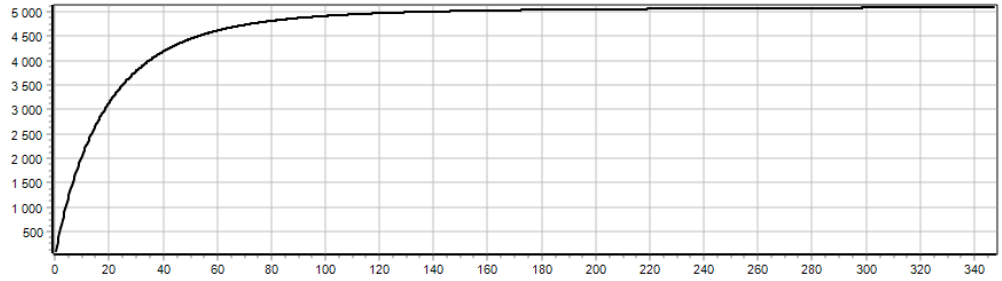


Рисунок 3 – Динамика коэффициента усиления при подаче на вход первой пространственной моды

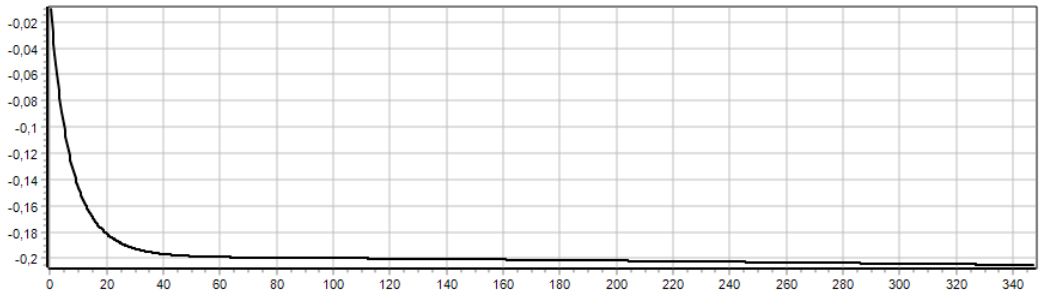


Рисунок 4 – Динамика понижения напора в первой добывающей скважине при подаче на вход второй пространственной моды

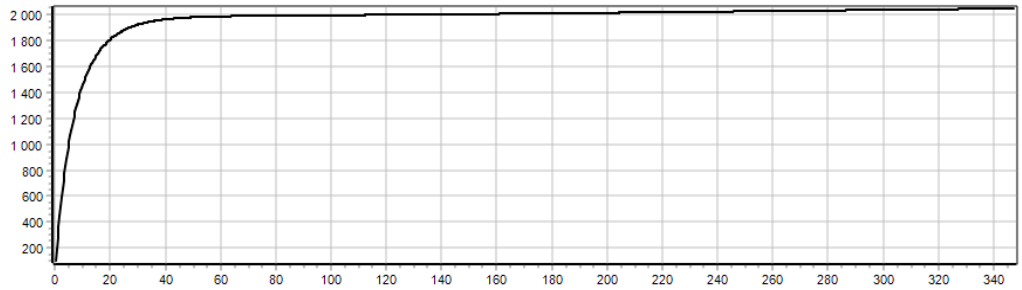


Рисунок 5 – Динамика коэффициента усиления при подаче на вход второй пространственной моды

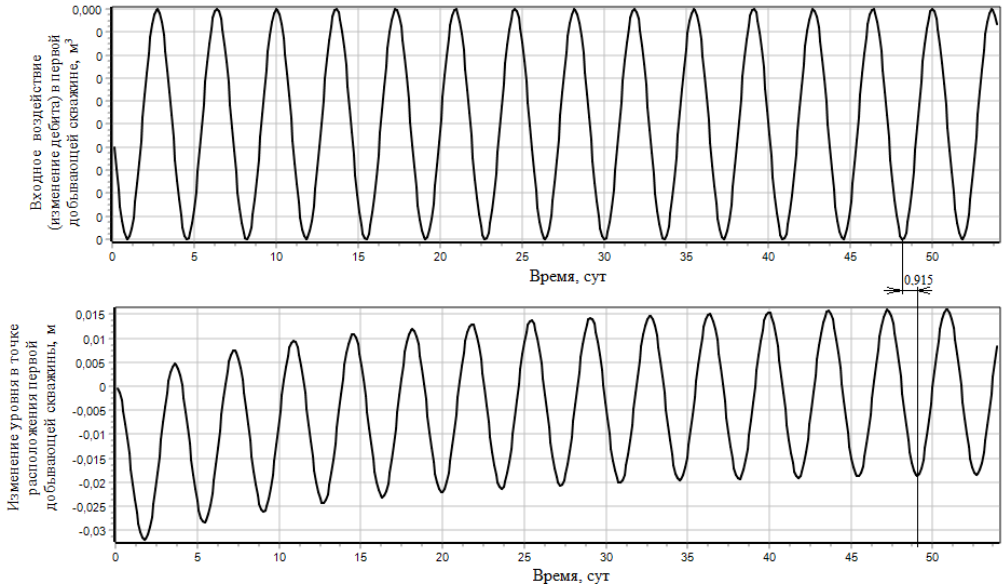


Рисунок 6 – Реакция объекта на динамическое входное воздействие

4 Метод определения параметров для аппроксимирующего звена

Рассматриваемый метод состоит из следующих шагов.

1. По результатам моделирования вычисляем статические коэффициенты усиления по выбранным пространственным модам:

$K_1 = 5096{,}5$,

$K_2 = 2047{,}7$.

2. Определяем сдвиг по фазе для функции выхода относительно входного воздействия (рисунок 6):

$f = -2\pi \cdot 0{,}915 / 3{,}64 = -1{,}58$.

3. Вычисляем значения K и Δz для аппроксимирующего звена.

Если статический коэффициент усиления для аппроксимирующего звена ($s = j\omega$, $\omega = 0$) мы приравниваем к статическим коэффициентам усиления по выбранным пространственным модам, то получаем систему уравнений для определения значений K и Δz.

$$\begin{cases} K_1 = \dfrac{K}{\beta_1 + 1} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot \Delta z) \\ K_2 = \dfrac{K}{\beta_2 + 1} \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \Delta z) \end{cases}$$

$$\beta_1 = G_1^{0.5},\ \beta_2 = G_2^{0.5},\ G_j = \psi_j^2,$$

$$\psi 1 = \pi \cdot 1/Lx,\ \psi 2 = \pi \cdot 2/Lx\ .$$

Затем мы подставляем исходные данные в систему уравнений и получаем численную модель аппроксимирующего звена:

$$\begin{cases} 5096{,}5 = \dfrac{K}{\beta_1 + 1} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot \Delta z) \\ 2047{,}7 = \dfrac{K}{\beta_2 + 1} \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \Delta z) \end{cases}$$

$$\beta_1 = (0{,}000076)^{0.5},\ \beta_2 = (0{,}000305)^{0.5}.$$

Решая систему уравнений, получаем искомые значения параметров: $\Delta z = 103{,}5$; $K = 12685{,}6$.

4. Определим значение параметра a^*. Для этого необходимо записать передаточную функцию для аппроксимирующего звена по первой пространственной моде [9,17]:

$$W(G_1, s) = \frac{K}{\beta_1 + 1} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot \Delta z),$$

$$\beta_1 = \left(\frac{s}{a^*} + \psi_1^2 \right)^{0.5}.$$

Полагаем, что $s = j\omega$ (ω = 0,00002), тогда уравнение для определения фазы аппроксимирующей функции может быть записано в виде:

$$\varphi = -\Delta z \cdot \mathrm{Im}(\beta_1) - \arctan \frac{\mathrm{Im}(\beta_1)}{\mathrm{Re}(\beta_1) + 1} \quad (20)$$

Для рассогласования фаз Δ_R можно записать выражение:

$$\Delta_R = -f - 103.5 \cdot \mathrm{Im}(\beta_1) - \arctan \frac{\mathrm{Im}(\beta_1)}{\mathrm{Re}(\beta_1) + 1} \quad (21)$$

Нам необходимо вычислить значение параметра a^*, для которого выполняется условие $\varphi = f$, где f = -1,58. Численно решая уравнение (21), получим значение a^* = 0,037844. На рисунке 7 показан график изменения рассогласования Δ_R, построенный по результатам вычислений.

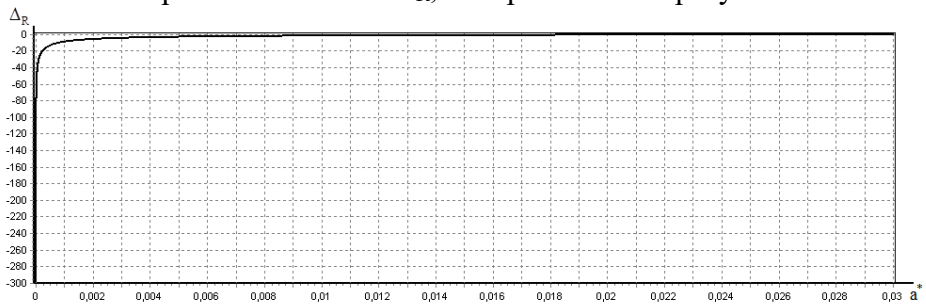


Рисунок 7 – График изменения рассогласования

Полученная передаточная функция для аппроксимирующего звена записывается в виде:

$$W_a(G,s) = \frac{12685.6}{\beta(G,s) + 1} \cdot \exp(-\beta(G,s) \cdot 103.5), \quad (22)$$

$$\beta(G,s) = \left(\frac{s}{0.037844} + G \right)^{0.5}.$$

Заключение

В работе осуществлен анализ динамических характеристик Железноводского месторождения, водоносные пласты которого расположены не горизонтально и гидрогеологическая схема представляет собой систему с переменными границами. Показано построение нестандартной аппроксимационной модели рассматриваемого месторождения с использованием численного решения. Полученная аппроксимационная модель (22) может быть использована при синтезе распределенных систем управления дебитами добывающих скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Межрегиональной организации содействия развитию рынка геоинформационных технологий и услуг URL: http://www.gisa.ru (дата обращения 12.02.2019 г.)

2. Pershin I.M., Drovosekova, T.I. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskiye Mineralnye Vody (Caucasus Mineral Waters). Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. 7519732 pp 215-217

3. Pershin I.M., Pervukhin D A, Ilyushin Y V, Afanaseva O V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032029 . pp. 1-7.

4. Pershin I.M., Pervukhin D A, Ilyushin Y V, Afanaseva O V. Design of distributed systems of hydrolithospere processes management. Selection of optimal number of extracting wells. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032030 pp. 1-6.

5. Pershin I M, Malkov A V, Pomelyayko I S. Designing a Control System for Underground Water Intakes //International science and technology conference "Earth science".IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 272 (2019) 022026.

6. Григорьев В.В., Быстров С.В., Першин И.М., Мансурова О.К., Першин М.И. Качественное распределение мод в системах с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – № 7. – 2016. – С. 12-18.

7. 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). – 2014. – С. 40-47.

8. Першин И.М., Дубогрей В.Ф., Малков А.В. Методика синтеза распределенных систем управления режимами эксплуатации месторождений минеральных вод // Известия вузов. Геология и разведка. – № 2. – 2012. –С. 74-78.

9. Першин И.М., Малков А.В., Веселов Г.Е., Першин М.И. Автоматизация технологических процессов добычи гидроминерального сырья. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2018, № 5 (199).

10. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир,2012. – 476 с.

11. Малков А.В., Першин М.И., Помеляйко И.С., Уткин В.А. и др. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод. Системный анализ, диагностика, прогноз и управление. – М.: Наука, 2015. – 283 с.

12. Малков А.В., Першин И.М., Першин М.И. Оптимизация количества водозаборных скважин при эксплуатации месторождений минеральных вод // Недропользование XXI век. / Межотраслевой научно-технический журнал. – № 1 (51). – 2015. – С.100-104.

13. Веселов Г.Е., Першин М.И. Проектирование распределенных систем управления гидролитосферными процессами // Известия вузов. Геология и разведка. – № 1. – 2016. – С.99-105.

14. Малков А.В., Першин И.М. Обоснование экологически безопасных режимов эксплуатации минеральных вод района КМВ // Недропользование XXI век / Межотраслевой научно-технический журнал. – №5 (42). – 2013. – С. 46-53.

15. 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.

16. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами: проблемы и перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. – № 6. – 2005. – С.2-10.

17. Pershin M.I., Papush E.G., Spivak A.O. Approximation Models for the Hydrolitospheric Processes // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 8602437

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-461-469

Асадулаги Мир-Амаль Миррашидович

Санкт-Петербургский горный университет

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСРЕДОТОЧЕННОГО И РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛИТОСФЕРНЫМ ПРОЦЕССОМ

Аннотация: *В докладе рассматриваются вопросы управления гидродинамическими процессами в водоносных горизонтах месторождений минеральных вод при использовании математических моделей. Управление заключается в поддержании напоров водоносных горизонтов на заданной отметке с целью сохранения гидроминеральной базы региона. В качестве корректирующих блоков рассматриваются регуляторы сосредоточенного и распределенного типа, параметры которых вычисляются частотными методами синтеза регуляторов. В докладе приведены результаты применения данных регуляторов в системах управления гидродинамическим процессом.*

Ключевые слова: *моделирование, водоносные горизонты, системы управления, сосредоточенный и распределенный регуляторы.*

Abstract: *The report discusses controlling of hydrodynamic processes in the aquifers of mineral water deposits using mathematical models. Controlling consists in maintaining the pressure of the aquifers at a given elevation in order to maintain the hydro-mineral source of the region. As correcting blocks there are considered regulators of concentrated (lumped) and distributed type, the parameters of which are calculated by frequency methods of synthesis of regulators. The report presents the results of the use of these regulators in control systems of the hydrodynamic process.*

Keywords: *modeling, aquifers, control systems, lumped and distributed regulators.*

Введение.

В данной работе рассматривается способ управления режимами эксплуатации месторождений минеральных вод [9,14,15] с применением регуляторов различного типа, а именно пропорционально-интегро-дифференциального (ПИД) регулятора [2,4,7,11] и распределенного высокоточного регулятора (РВР) [3,13,14]. Для проектирования системы управления гидродинамическим процессом требуется провести математическое моделирование [1,8]. Модель включает дифференциальные уравнения, описывающие процессы геофильтрации в водоносных горизонтах [10]. Уравнения дополняются условиями однозначности, представляющими собой совокупность начальных и граничных условий. Важным ограничением математической модели являются её граничные условия, так как границы водоносных горизонтов в действительности имеют криволинейную структуру, а в математической модели они описываются прямыми отрезками. Поскольку определение гидравлических параметров водоносных горизонтов – сложная и дорогостоящая задача, то рассматривается задача аппроксимации динамических и статических характеристик объекта с использованием экспериментальных данных. В качестве примера рассматривается модель Кисловодского месторождения минеральных вод.

Математическая модель гидродинамических процессов в водоносных горизонтах

Рассматриваемая математическая модель описывает процесс фильтрации в пластах (коллекторах) и взаимосвязи между водоносными пластами. Схема Кисловодского месторождения приведена на рис. 1 [10]. Данное схематическое изображение иллюстрирует четыре водоносных горизонта, один из которых является горизонтом грунтовых вод, другие –

минеральной воды. Эксплуатируемым пластом в данном случае является самый нижний пласт. Водозабор осуществляется четырьмя добывающими скважинами, а измерения напора воды в пластах происходит через контрольные (наблюдательные) скважины.

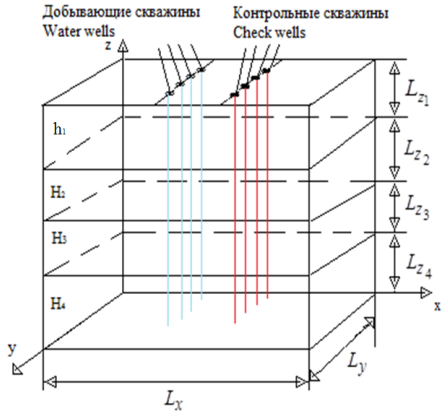


Рис. 1. Схема месторождения

Математическая модель рассматриваемого объекта управления записывается в виде:

$$\frac{\partial h_1(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = k_{1,x}\frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{1,y}\frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{1,z}\frac{\partial^2 h_1(x,y,z,\tau)}{\partial z_1^{\,2}}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_2(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} =$$

$$= \frac{1}{\eta_2}\left(k_{2,x}\frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{2,y}\frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{2,z}\frac{\partial^2 H_2(x,y,z,\tau)}{\partial z_2^{\,2}}\right) - \quad (2)$$

$$-F_{2,x}\cdot\frac{\partial H_2(x,y,z,\tau)}{\partial x};$$

$$\frac{\partial H_3(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} =$$

$$= \frac{1}{\eta_3}\left(k_{3,x}\frac{\partial^2 H_3(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{3,y}\frac{\partial^2 H_3(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{3,z}\frac{\partial^2 H_3(x,y,z,\tau)}{\partial z_3^{\,2}}\right) - \quad (3)$$

$$-F_{3,x}\cdot\frac{\partial H_3(x,y,z,\tau)}{\partial x};$$

$$\frac{\partial H_4(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} =$$

$$= \frac{1}{\eta_4}\left(k_{4,x}\frac{\partial^2 H_4(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{4,y}\frac{\partial^2 H_4(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{4,z}\frac{\partial^2 H_4(x,y,z,\tau)}{\partial z_4^{\,2}}\right) - \quad (4)$$

$$-F_{4,x}\cdot\frac{\partial H_4(x,y,z,\tau)}{\partial x} + V(y_j,\tau)\cdot\delta(x_{0,j},y_{0,j},z_{0,j});$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z_i}\ ;\ (i = 1,2,3,4); \quad (5)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z_i}\ ;\ (i = 1,2,3,4);$$

где: h_1 – давление в пласте грунтовых вод; H_i – давление в изучаемом i-м водоносном горизонте (i = 2,3,4); η_i – упругоемкость i-го горизонта; $F_{i,x}$– скорость движения воды в i-м водоносном горизонте; $k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$–коэффициенты фильтрации по пространственным координатам;

$V(y_j,\tau)$ – понижение уровня в точке расположения *j*-ой водозаборной скважины; $\delta(x_j,y_j,z_j)$ – функция, которая принимает значение 1 при $x = x_j$, $y = y_j$, $z = z_j$, а в остальных случаях равна 0; x_j, y_j, z_j – координаты *j*-ой водозаборной скважины (j = 1,2,3,4).

Также математическая модель объекта осложнена тем, что учитывает случайный характер внешних факторов в виде 10 % шума на понижении уровня воды в точках расположения скважин и на скорости движения воды в пластах [12]. Описание случайных сигналов в среде программирования Delphi: randG(0,0.1·$V(y_j,\tau)$) – помеха на управляющем воздействии в водозаборных скважинах $V(y_j,\tau)$, randG(0,0.1·$F_{i,x}$) – помеха на скоростях движения воды в водоносных пластах $F_{i,x}$.

Граничные условия между пластами задаются в виде (условия Дарси):

$$h_1(x,y,L_{z_1},\tau) = h_1(x,y,L_{z_1},\tau) + b_1\cdot\left(H_2(x,y,0,\tau) - h_1(x,y,L_{z_1},\tau)\right), \quad (5)$$

$$H_2(x,y,0,\tau) = H_2(x,y,0,\tau) - b_1\cdot\left(H_2(x,y,0,\tau) - h_1(x,y,L_{z_1},\tau)\right), \quad (6)$$

$$H_i(x,y,L_{z_i},\tau) = H_i(x,y,L_{z_i},\tau) + b_i\cdot\left(H_i(x,y,0,\tau) - H_i(x,y,L_{z_i},\tau)\right), \quad (7)$$

$$H_{i+1}(x,y,0,\tau) = H_{i+1}(x,y,0,\tau) - b_i\cdot\left(H_{i+1}(x,y,0,\tau) - H_i(x,y,L_{z_i},\tau)\right), \quad (8)$$

где b_i – параметры перетекания (i = 1…3).

Нижняя граница нижнего пласта:

$$\partial H_4(x,y,L_{z_4},\tau)/\partial z = 0.$$

Боковые грани:

$$h_1(0,y,z,\tau) = h_{10};\ \partial h_1(L_x,y,z,\tau)/\partial x = 0;\ h_1(x,0,z,\tau) = h_1(x,L_y,z,\tau) = h_{1,0};$$

$$H_i(0,y,z,\tau) = H_{i0};$$

$$\partial H_i(L_x,y,z,\tau)/\partial x = 0;$$

$$H_i(x,0,z,\tau) = H_i(x,L_y,z,\tau) = H_{i0};$$

где h_{10}, H_{i0} – начальные состояния невозмущенных пластов (i=2…4).

Поскольку приведенная математическая модель объекта управления не имеет аналитического решения, то для оценки динамики объекта модель приводится к дискретному виду [6].

Геометрические данные месторождения (в метрах): $L_x = 350$, $L_y = 350$, $L_{z_1} = 140$, $L_{z_2} = 50$, $L_{z_3} = 60$, $L_{z_4} = 50$.

Физические параметры, используемые при моделировании объекта управления, были заданы в виде:

водоотдача, 1/м: $\eta_2 = 0,0010$, $\eta_3 = 0,0006$, $\eta_4 = 0,0005$;

коэффициенты фильтрации по соответствующим координатам, м/сут: $k_{1,x} = k_{1,y} = 0,192$; $k_{1,z} = 0,0195$; $k_{2,x} = k_{2,y} = 0,19$; $k_{3,x} = k_{4,x} = 0,14$; $k_{3,y} = k_{4,y} = 0,19$; $k_{2,x} = k_{3,z} = k_{4,z} = 0,019$;

параметр перетекания, 1/сут: $b_1 = 0,00003$, $b_2 = 0,000033$, $b_3 = 0,000035$;

начальное состояние *i*-го невозмущенного пласта, м: $H_{10\xi} = (\xi - 1)\cdot\Delta z_1$, $H_{20} = 220$, $H_{30} = 270$, $H_{40} = 350$;

шаги дискретизации по соответствующим координатам, м: $\Delta x = L_x/(N_x - 1)$, $\Delta y = L_y/(N_y - 1)$, $\Delta z_i = L_{z_i}/(N_{z_i} - 1)$, ($i$ = 1…4), где N_x, N_y, N_{z_i} - число точек дискретизации по соответствующим координатам (в рассматриваемом примере: $N_x = 8$, $N_y = 8$, $N_{z_i} = 7$).

Анализ объекта управления и синтез регуляторов

На основе данных была составлена вычислительная программа, численно моделирующая гидролитосферные процессы, в среде программирования Delphi для анализа динамических характеристик объекта управления [6,8,10].

В качестве входного воздействия на объект управления используем функцию $U_j(\tau)$, которая связана с функцией $V(y_j,\tau)$ следующим выражением:

$$V(y_j,\tau) = 0,001 \cdot U_j, \qquad (9)$$

где $V(y_j,\tau)$ – изменение напора, которое вызвано воздействием j-й добывающей скважиной (в данном случае $j = 1\ldots4$).

Решение задачи управления может быть осуществлено в классе многомерных систем (с использованием передаточной матрицы объекта управления), либо с применением методики синтеза систем с распределенными параметрами. В распределенных системах используют реакции распределенного объекта на выбранные вектор-функции оператора объекта (пространственные моды).

Синтез сосредоточенного регулятора

Подавая поочередно входное воздействие, представленное в виде ступенчатой функции, на каждую водозаборную скважину в отдельности, определяем параметры функций выхода в контрольных скважинах.

В результате решения, численными методами, полученной системы дифференциальных уравнений в частных производных для 4-х добывающих скважин, было получено 16 графиков переходных процессов, из которых были определены постоянные времени и коэффициенты передачи. На рисунке 2 представлена реакция объекта в 4 наблюдательных скважинах при воздействии 1-ой добывающей скважины.

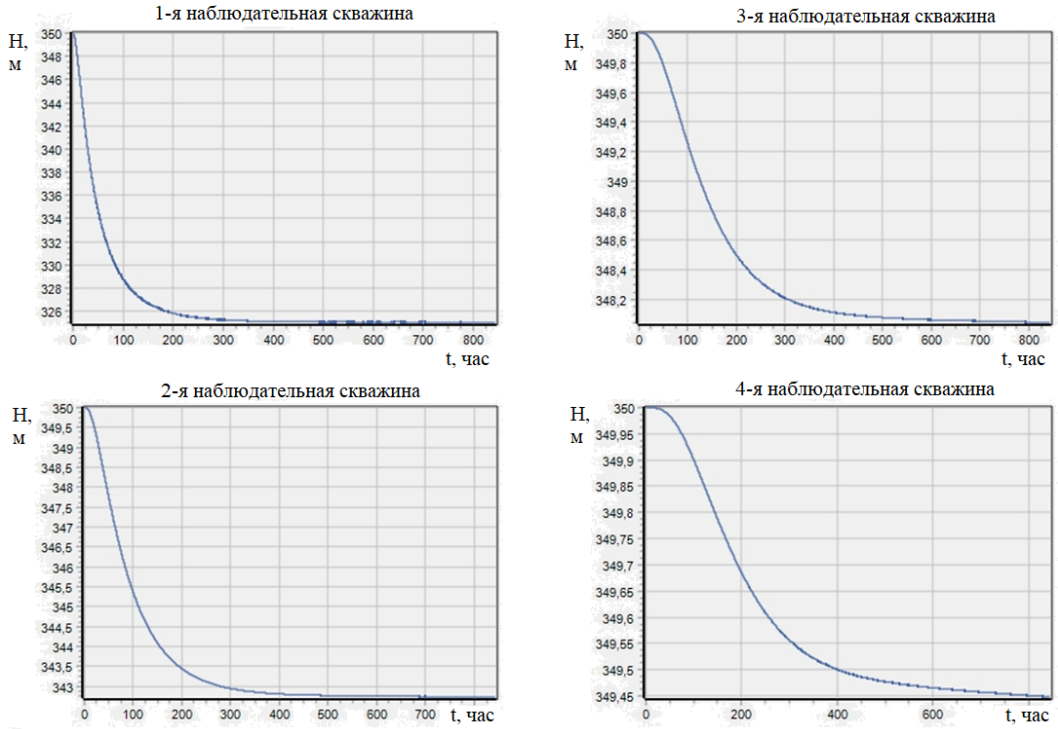


Рис. 2. Переходные процессы при входном воздействии на 1-ю скважину (j=1)

С учётом количества скважин передаточная матрица системы может быть представлена в виде:

$$W = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & W_{34} \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} & W_{44} \end{vmatrix} \quad (10)$$

где $W_{jk} = \frac{K_{jk}}{T_{jk} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{jk} \cdot s}$, s – оператор Лапласа, K_{jk} – коэффициент усиления, T_{jk} – постоянная времени, τ – время запаздывания, j – номер водозаборной скважины, k – номер наблюдательной или контрольной скважины.

Если взаимосвязь между j-ой добывающей скважиной и k-ой контрольной ($j,k = \overline{1,4}$) существует, но матрица W обладает свойством диагональной доминантности, тогда синтез регуляторов осуществляется с использованием спектров Гершгорина [5,17,18]. Следует отметить, что в этом случае, при синтезе рассматриваемой системы управления мы вынуждены искусственно занижать коэффициенты усиления регулятора (плата за не учет взаимовлияния между j-ой добывающей и k-ой контрольной скважинами), что приводит к ухудшению точностных и динамических характеристик системы.

В данном случае матрица W оказывается доминантной, что можно судить исходя из матрицы K (11), состоящей из коэффициентов K_{jk}, однако диагональные элементы не больше суммы модулей остальных элементов в строке на несколько порядков, как обычно требуется, что говорит о взаимовлиянии скважин.

$$K = \begin{vmatrix} 25 & 7.2 & 2 & 0.6 \\ 7.2 & 25 & 7.2 & 2 \\ 2 & 7.2 & 25 & 7.2 \\ 0.6 & 2 & 7.2 & 25 \end{vmatrix} \quad (11)$$

Вследствие геометрических особенностей объекта управления и равной удаленности скважин друг от друга и от границ объекта, диагональные элементы матрицы равны:

$$W_{11} = W_{22} = W_{33} = W_{44} = \frac{25}{67.5 \cdot s + 1} \cdot e^{-7.5 \cdot s} \quad (12)$$

Следовательно, для каждой добывающей скважины будут применены одинаково рассчитанные ПИД-регуляторы.

В качестве базовой структуры сосредоточенных корректирующих блоков системы управления, выберем сумму следующих звеньев: пропорциональное, интегральное, дифференциальное. Т.е. данные блоки представляют собой ПИД-регулятор. На запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ и на параметрический запас устойчивости Δ наложены следующие ограничения: $\Delta\varphi \geq \pi/6$, $\Delta=8$.

Передаточная функция рассчитанного регулятора имеет вид:

$$R(s) = K_p + \frac{1}{T_u \cdot s} + T_o \cdot s = 0.41378 + \frac{1}{158437.6736 \cdot s} + 0.000271 \cdot s \quad (13)$$

Синтез распределенного регулятора

Проведение экспериментальных исследований методами распределенных систем [9,14] (определения реакции системы на заданную пространственную моду) заключается в следующем. В установившемся режиме объекта управления, скачком подаем входное воздействие в виде выбранной пространственной моды (мода формируется исходя из значений на границах объекта):

$$U_\gamma = A \cdot \sin(\psi_\xi \cdot y_\gamma),\ \psi_\xi = \pi \cdot \xi / (8-1), \quad (14)$$

где $y_\gamma = (\gamma - 1) \cdot \Delta y$, ξ – порядок моды, γ – точки расположения водозаборных скважин (γ=3,4,5,6), Δy – шаг дискретизации по пространственной координате y, ψ_ξ – пространственная частота.

В рассматриваемом случае полагаем, что в точках 1 и 8 поддерживается установившееся значение понижения напора, то есть воздействие от водозаборных скважин при скачкообразном понижении напора равно нулю.

По результатам численного моделирования было выявлено, что объект принадлежит к классу пространственно-инвариантных [9,14], следовательно, для оценки динамики объекта достаточно информации полученной по любой выбранной скважине. Методика синтеза распределенных регуляторов использует результаты реакции распределенного объекта на две выбранные пространственные моды (в рассматриваемом случае были выбраны первая и третья моды). Графики реакции объекта на первую и третью пространственные моды входного воздействия, получены в точке расположения 2-й контрольной скважины $H_{4,5,4,4}$, (рис. 3 и рис. 4).

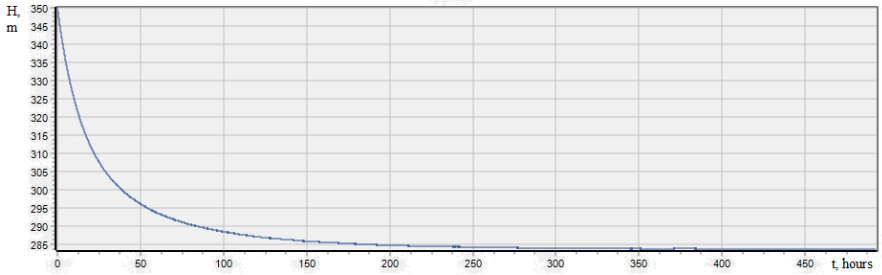


Рис. 3. Реакция объекта на первую моду (ξ = 1)

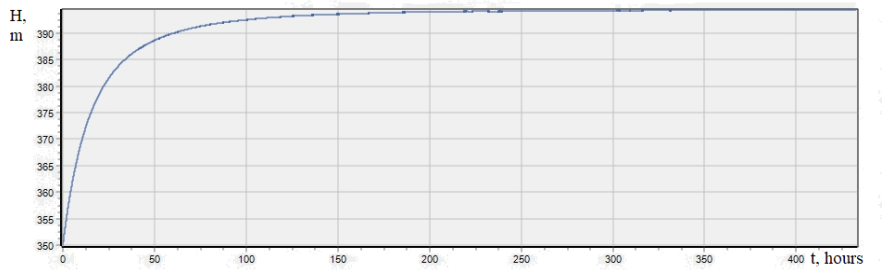


Рис. 4. Реакция объекта на третью моду (ξ=3)

Обычно аппроксимационную модель, описывающую реакцию объекта на выбранную пространственную моду, записывают в виде апериодического звена и звена с чистым запаздыванием. Исследования, приведенные в [15], показывают, что для распределенных объектов такая аппроксимация ведёт к значительным ошибкам при описании динамических характеристик объекта, что в свою очередь приводит к ошибкам, при решении задачи синтеза распределенных регуляторов. Поэтому, была предложена следующая аппроксимирующая функция:

$$W_{a,\eta}(s) = \frac{K}{\beta_\eta + 1} \cdot \exp\left(-\beta_\eta \cdot \Delta z\right) \qquad (15)$$

$$\beta_\eta = \left(\frac{s}{a} + \psi_\eta^2\right)^{1/2}, \ \left(\eta = \overline{1,\infty}\right),$$

где K – коэффициент, определяемый с использованием экспериментальных исследований.

Необходимо определить значения параметров $\boldsymbol{K}$, $\boldsymbol{\Delta z}$ и $\boldsymbol{a}$ для того, чтобы описать передаточную функцию объекта в виде аппроксимирующего звена (15). Для этого используем методику, описанную в [9].

В результате расчётов, описанных в [16] нами были рассчитаны искомые параметры и получена передаточная функция аппроксимирующего звена, которая записывается в виде:

$$W_{a,\eta}(s)=\frac{47.886}{\beta_\eta+1}\cdot\exp\left(-\beta_\eta\cdot 20.029\right),\ \beta_\eta=\left(\frac{s}{0.001318}+\psi_\eta^2\right)^{1/2}. \quad (16)$$

Используя методику синтеза распределенных регуляторов [9,14], были рассчитаны коэффициенты распределенного высокоточного регулятора (РВР), являющимся пространственным аналогом ПИД-регулятора ($\Delta\varphi\geq\pi/6$, $\Delta=2.699$):

$$W(s)=E_1\cdot\left[\frac{n_1-1}{n_1}-\frac{1}{n_1}\nabla^2\right]+E_4\cdot\left[\frac{n_4-1}{n_4}-\frac{1}{n_4}\nabla^2\right]\cdot\frac{1}{s}+E_2\cdot\left[\frac{n_2-1}{n_2}-\frac{1}{n_2}\nabla^2\right]\cdot s \quad (17)$$

n_1=1.011673; E_1=25.139676; n_2=∞; E_2=1079.880643; n_4=1.015523;E_4=0.000121.

Анализ замкнутой системы управления

Структурная схема системы управления с применением рассчитанных регуляторов может быть изображена следующим образом (рис. 5):

Рис. 5. Структурная схема системы управления

При моделировании системы управления, целевая функция была задана в виде $\overset{*}{H}(y_j,\tau)=H_4-1=350-1=349$.

Управляющее воздействие на объект управления, записанное во временной области, может быть представлено в виде:

При ПИД-регуляторе:

$$U(y,\tau)=0.41378\cdot\Delta H(y,\tau)+\frac{1}{158437.6736}\cdot\int_\tau\Delta H(y,\tau)\cdot d\tau+ +0.000271\cdot\frac{d\Delta H(y,\tau)}{d\tau}. \quad (18)$$

При РВР:

$$U(y,\tau)=25.139676\cdot\left[\frac{0.011673}{1.011673}\cdot\Delta H(y,\tau)-\frac{1}{1.011673}\cdot\nabla^2\Delta H(y,\tau)\right]+ 0.000121\cdot\int_\tau\left[\frac{0.015523}{1.015523}\cdot\Delta H(y,\tau)-\frac{1}{1.015523}\cdot\nabla^2\Delta H(y,\tau)\right]\cdot d\tau+ +1079.880643\cdot\frac{d\Delta H(y,\tau)}{d\tau}. \quad (19)$$

Преобразуя (18) и (19) и представляя в дискретной (по пространственной координате) форме, получим алгоритмы управления рассматриваемым процессом и запишем их в программу реализации замкнутой системы управления в Delphi.

Используя результаты моделирования работы замкнутой системы управления, получены графики переходного процесса системы с сосредоточенным ПИД-регулятором и распределенным регулятором РВР (рис. рис. 6 и 7).

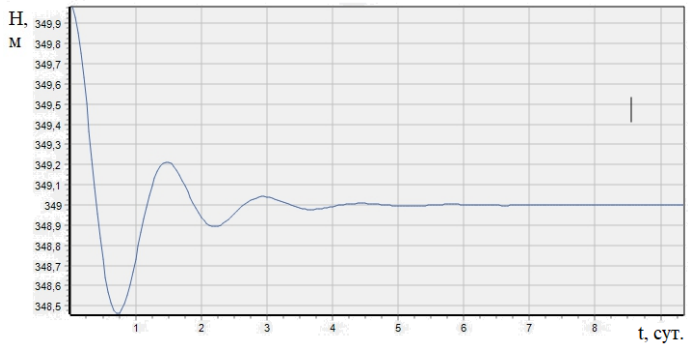


Рис. 6. График переходного процесса с сосредоточенным регулятором

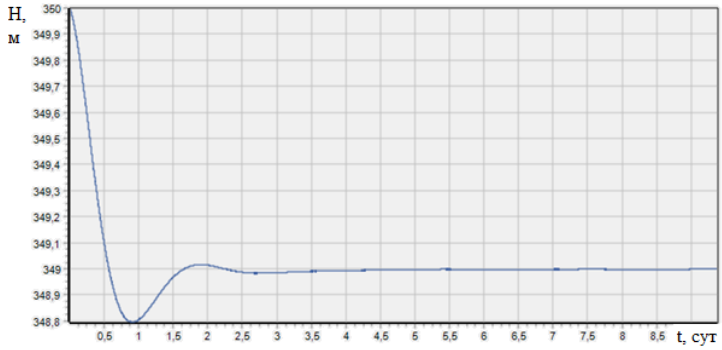


Рис. 7. График переходного процесса с распределенным регулятором

Как показывают результаты численного моделирования замкнутой системы управления, значения параметров регуляторов найдены верно для поддержания давления в пласте на заданной отметке, а ошибка регулирования стремится к нулю. Однако стоит отметить преимущество РВР над ПИД-регулятором, так как перерегулирование с распределенным регулятором заметно меньше ($\sigma_{рвр} = 20\% < \sigma_{пид} = 53\%$) при меньшем запасе параметрического возмущения ($\Delta_{рвр} = 2{,}7 < \Delta_{пид} = 8$), а в установившийся режим система входит несколько быстрее и без характерных колебаний.

Вывод: для систем управления параметрами гидрогеологического объекта целесообразнее использовать распределенные регуляторы, нежели сосредоточенные.

На практике, реализация данных управляющих алгоритмов возможна с использованием как аналоговой, так и цифровой элементной базы. Систему автоматического управления можно составить из аналоговых блоков, однако наиболее целесообразно использовать программируемые цифровые логические контроллеры, т.к. аналоговая реализация интегрирующих звеньев затруднена вследствие крупных габаритов емкостных элементов используемых в интегрирующих и дифференцирующих цепях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асадулаги М.М., Першин И.М. Способы моделирования распределенных систем при случайных воздействиях // Современная наука и инновации. Пятигорск. СКФУ. 2017. Выпуск № 1 (17). С. 31-38.

2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования, изд. 4-е. СПб: Профессия, 2003. 752 с.

3. Воронин А.Ю. Модифицированный частотный метод поиска параметров распределенного высокоточного регулятора // Журнал: Мехатроника, Автоматизация, Управление №2. Том 16. 2015. С. 89-95.

4. Воронов А.А., Ким Д.П. Теория автоматического управления. Часть 1. Теория линейных систем автоматического управления. М.: Высшая школа, 1986. 368 с.

5. Гершгорин С.А. О разграничении собственных значений матрицы. Изв. АН СССР, отд. физ.-мат. наук, 1931. С. 749-754.

6. Микеладзе Ш.Е. Численные методы интегрирования дифференциальных уравнений с частными производными. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 108 с.

7. Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х. Теория автоматического управления: Учеб.для вузов. М.: Высш. шк., 2005. 567 с.

8. Душин С.Е., Красов А.В., Литвинов Ю.В. Моделирование систем и комплексов. Спб: СПбГУ ИТМО, 2010. 177 с.

9. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 476 с.

10. Малков А.В. Першин И.М., Помеляйко И.С. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод: системный анализ, диагностика, прогноз, управление. М.: Наука, 2015. 283 с.

11. Михайлов В.С. Теория управления. К.: Выща шк., 1988. 312 с.

12. Острем К. Введение в стохастическую теорию управления. М.: Мир, 1973. 324 с.

13. Першин И.М. Синтез систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 2-10.

14. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: РИО-КМВ, 2007. 243 с.

15. Першин М.И. Исследование погрешностей динамических характеристик распределенных объектов при аппроксимации // Современная наука и инновации. Научный журнал. Выпуск № 4(8), 2014. С. 46-50.

16. Asadulagi, M.M., Pervukhin, D.A. Stochastic control system of hydrodynamic processes in aquifers // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects - 11th conference of the Russian-German Raw Materials, 2018, pp. 175-185.

17. Price E.B. Bounds for determinants with dominant principal diagonal. Proc. Amer. Math. Soc., 2 (1951), pp. 497-502.

18. Richard A. Brualdi. Spectra of digraphs. Linear Algebra and its Applications, 432:9 (2010), 2181.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-470-476

Дилигенская Анна Николаевна

Самарский государственный технический университет

МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. *Предложены основанные на теории оптимального управления объектами с распределенными параметрами методы параметрической оптимизации, позволяющие осуществлять идентификацию систем технологической теплофизики на основе решения обратных задач теплопроводности. Исходная некорректно поставленная задача приводится к условно-корректной постановке, решение которой ищется на компактном множестве соответствующего вида относительно вектора параметров идентифицируемой характеристики. Разработанные методы ориентированы на теплофизические исследования технологических процессов и систем, проектирование теплотехнического оборудования.*

Ключевые слова: *системы с распределенными параметрами, обратные задачи технологической физики, параметрическая оптимизация, равномерная метрика оценивания*

Abstract. *A parametric optimization methods based on the optimal control theory for objects with distributed parameters are proposed for the identification of technological thermophysics systems. The solution of inverse heat conduction problems is realized. The initial ill-posed problem is reduced to a conditionally correct statement, the solution of which is sought on a compact set of the corresponding form with respect to a parameters vector of the identified characteristic. The developed methods are focused on thermophysical research of technological processes and systems, design of heating equipment.*

Key words: *distributed parameter systems, inverse problems of technological physics, parametric optimization, uniform estimation metric*

Автоматическое управление и эффективная реализация технологических процессов в широком спектре производственных отраслей - теплотехнике, машиностроении, авиационной и космической промышленности, - возможна только при наличии адекватного математического описания процесса, учитывающего всю совокупность действующих на него факторов. В условиях реальных производств построение математической модели основывается на идентификации параметров и характеристик процесса и влияющих на него доминирующих внешних воздействий [1, 2]

Обширный круг процессов тепломассообмена, термодинамики, диффузии, термоупругости, механики сплошных сред, аэродинамики, электромагнитных процессов в твердых телах, жидкостях или газах описывается уравнениями математической физики в частных производных гиперболического, параболического или эллиптического типа при заданных условиях однозначности.

При этом, как правило, в реальных условиях реализации производственных процессов отсутствует достоверная информация о значениях параметров оператора математической модели, коэффициентов граничных условий, о функции, задающей начальное состояние процесса или правую часть уравнения. Идентификация неизвестных параметров или характеристик технологических процессов является самостоятельной сложной проблемой, для решения которой разработано большое число разнообразных способов и методов. В настоящее время эффективным подходом к решению широкого класса задач идентификации математической модели технологического процесса на основе использования доступной

косвенной информации о функции состояния является применение математического аппарата теории обратных и некорректных задач математической физики [3, 4].

Решения обратных задач математической физики, сформулированных в соответствующей предметной области, должны обладать условиями устойчивости и обеспечивать требуемую точность. Для подавляющего большинства реальных технологических процессов получение точных явных решений соответствующих обратных задач невозможно, в связи с чем, алгоритмы приближенного решения задачи должны обеспечить допустимую величину погрешности [5].

В настоящее время базовым широко распространенным подходом к исследованию рассматриваемого класса задач являются численные регуляризирующие алгоритмы с применением сглаживающих функционалов, позволяющие найти решение, обладающее свойствами корректности по Тихонову (условной корректности) в среднеквадратичной метрике.

Реализующие данный подход методы используются для широкого круга обратных задач теплообмена, термоупругости, диффузии и других процессов, но обладают определенными ограничениями, связанными, в том числе, с отсутствием универсальной однозначной процедуры их реализации.

В данной статье на примере широкого круга обратных задач технологической теплофизики показан новый подход к решению задачи интерпретации данных физического эксперимента, основанный на использовании методов теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, который позволяет найти физически реализуемые искомые характеристики на выбранном компактном множестве на основе использования информации об их степени гладкости.

В базовом случае рассматривается линейное одномерное уравнение в частных производных параболического типа

$$\frac{\partial\theta(x,\varphi)}{\partial\varphi}=a\left(\frac{\partial^2\theta(x,\varphi)}{\partial x^2}+\frac{\Gamma}{x}\frac{\partial\theta(x,\varphi)}{\partial x}\right)+\Psi(x)v(\varphi);\;\; 0<x<L;\; 0<\varphi\le\varphi_{end},$$

дополненное краевыми условиями

$$\frac{\partial\theta(L,\varphi)}{\partial x}=q(\varphi);\;\frac{\partial\theta(0,\varphi)}{\partial x}=0;\;\varphi\in[0,\varphi_{end}];\;\theta(x,0)=\theta_0(x),x\in\left[0,L\right],$$

или

$$\frac{\partial\theta(L,\varphi)}{\partial x}+Bi\cdot\theta(L,\varphi)=\mathrm{Bi}\cdot\theta_c(\varphi);\;\frac{\partial\theta(0,\varphi)}{\partial x}=0;\;\varphi\in[0,\varphi_{end}];\theta(x,0)=\theta_0(x),x\in\left[0,L\right],$$

где $\theta(x,\varphi)$ - температурное поле, зависящее от числа Фурье φ и пространственной координаты x; $v(\varphi)$ - мощность, а $\Psi(x)$ - закон пространственного распределения внутренних источников тепла; $q(\varphi)$ - плотность граничного теплового потока; $\theta_0(x)$ - начальное состояние; Γ - коэффициент формы нагреваемого тела; a - коэффициент температуропроводности; Bi - критерий Био.

В качестве дополнительной информации $\theta^*(x^*,\varphi)$ используются данные физических экспериментов, полученные на временном интервале идентификации $\varphi\in\left[0,\varphi^*\right]$ в результате измерения доступной величины, в качестве которой наиболее часто рассматривается температура в некоторой фиксированной точке x^* внутри тела $x^*\in\left[0,L\right)$ или на его поверхности $x^*=L$.

Разработанный конструктивный метод основан на методологии минимаксной оптимизации [6, 7] результирующих состояний объектов с распределенными параметрами [8], в соответствии с чем, обратная задача технологической физики формулируется в экстремальной постановке как задача оптимального управления [9]. В роли искомого оптимального управляющего воздействия рассматривается идентифицируемая величина $h=\{q,\theta_c,v,a,\mathrm{Bi}\}$, в

качестве которой в зависимости от постановки задачи высупают граничное $\{q(\varphi),\theta_c(\varphi)\}$ или внутреннее $v(\varphi)$ воздействие, параметры a, определяющие теплофизические свойства, или коэффициент теплоотдачи Bi. Температурная невязка формируется и оценивается в равномерной метрике в форме величины отклонения $\theta(x^*,\varphi)-\theta^*(x^*,\varphi)$ модельного значения температурного поля $\theta(x^*,\varphi)$, соответствующего искомому оптимальному управлению, от результатов эксперимента на всем интервале идентификации $\theta^*(x^*,\varphi)$.

Особенностью разработанного метода является формулировка обратной задачи в условно корректной постановке, что достигается за счет сужения множества искомых решений до класса корректности, априори задаваемого в виде компактного множества [5]. Это множество выбирается исходя из соображений физической реализуемости функций на основе их достаточной гладкости, обусловленной спецификой предметной области. Так, для процессов нестационарной теплопроводности, исключающих резкие локальные скачки характеристик и результирующих температур, наиболее типичными представителями таких компактов являются следующие классы:

множество постоянных функций

$$h(\varphi)=h^0=const\le h_{\max},\varphi=\left[0,\varphi^*\right], \tag{1}$$

имеющих смысл неизменных, усредненных на заданном временном интервале, значений искомых параметров или характеристик процесса. Такое усреднение может рассматриваться как первое приближение к поиску требуемых величин и в некотором диапазоне температурных изменений может обладать удовлетворительной точностью;

– множество непрерывных со своей первой производной функций, что достигается на основе перехода к условному управляющему воздействию

$$w(\varphi)=\frac{d^2h(\varphi)}{d\varphi^2};\ |w(\varphi)|\le|w_{\max}|, \tag{2}$$

по отношению к которому далее и формулируется задача оптимального управления;

– или множество полиномиальных зависимостей времени

$$h(\varphi)=\sum_{n=0}^{N}b_n\varphi^n. \tag{3}$$

Разработанные на сегодняшний день методы теории оптимального управления системами с распределенными параметрами [10] позволяют отыскать решение поставленной задачи вплоть до получения конкретных результатов и, тем самым, определить параметрическую форму представления искомой характеристики в каждом из предложенных случаев.

При поиске решений в классе постоянных функций неизвестное значение h^0 рассматривается как единственный параметр искомого управления (1) [11]. При рассмотрении множества полиномиальных функций при заданном числе N коэффициенты b_n образуют искомый вектор параметров $\Delta=(b_0,b_1..b_N)$, формирующий искомую величину (3) [12]. Для поиска решений в классе непрерывных и непрерывно-дифференцируемых функций используются необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина при учете дополнительных условий перехода к новому управлению и фазовых ограничений [13]. Такой подход приводит к параметризованной форме искомых оптимальных управлений в виде кусочно-параболических функций времени, которые также при заданном числе N, имеющим смысл числа участков постоянства $w(\varphi)=h''(\varphi)$, полностью определяются соответствующим вектором параметров $\Delta=(b_1..b_N,b_{N+1},b_{N+2})$, заданным на замкнутом ограниченном множестве.

Тем самым, во всех рассмотренных случаях идентифицируемая характеристика однозначно характеризуется вектором параметров Δ, зависящим от выбираемого числа N.

Применение точного математического описания рассматриваемого процесса в виде бесконечной системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно коэффициентов разложения в ряд по собственным функциям краевой задачи при использовании параметрического представления искомых величин приводит к параметризованной форме температурного поля $\theta(x,\varphi,\Delta)$, которое также определяется вектором Δ. Полученное представление $\theta(x,\varphi,\Delta)$ позволяет сформулировать специальную негладкую задачу математического программирования с минимаксным функционалом качества

$$I_1 = \max_{\varphi\in[0,\varphi^*]} \left|\theta\left(x^*,\varphi,\Delta\right) - \theta^*\left(x,\varphi\right)\right| \to \min_{\Delta} \qquad (4)$$

относительно вектора параметров Δ.

Поиск числа N и значений вектора Δ в задаче минимаксной оптимизации (4) и соответствует решению исходной обратной задачи технологической теплофизики.

Решение негладкой задачи математического программирования (4) может быть осуществлено только на базе специальных численных методов, среди которых одним из наиболее эффективных является метод [10], основанный на альтернансных (чебышевских) свойствах искомых оптимальных величин температурных невязок $\theta\left(x^*,\varphi,\Delta^0\right) - \theta^*\left(x^*,\varphi\right)$. Эти свойства в одномерном случае позволяют однозначно определить конфигурацию невязки на интервале идентификации, что приводит к замкнутой системе соотношений относительно всех неизвестных параметров процесса.

Изложенный подход распространен на иные варианты постановок и решений соответствующих обратных задач, обусловленных типичными условиями реализации технологических процессов. Метод адаптирован для идентификации базовых характеристик процесса: начального состояния $\theta_0(x)$, закона распределения внутренних теплоисточников $\Psi(x)$ и теплофизических параметров, - в случае их зависимости от пространственной координаты [14, 15]. Показаны условия применимости метода для решения коэффициентной обратной задачи технологической теплофизики, формулируемой на основе нелинейного уравнения теплопроводности, учитывающего зависимость коэффициента теплопроводности $\lambda(T)$ от температуры [12].

Аппарат теории управления объектами с распределенными параметрами может служить и для решения более сложного класса обратных задач математической физики, заданных в одномерной или двумерной области при поиске характеристик $h(x,\varphi)$, зависящих от двух переменных: пространственной координаты и времени [16, 17]. Для этого используется модальное описание идентифицируемой характеристики и температурного состояния в форме разложения в ряды одинаковой размерности по собственным функциям краевой задачи. Разложение искомой величины в усеченный ряд имеет вид

$$h(x,\varphi) \approx \sum_n \bar{h}_n(\mu_n,\varphi) g(\mu_n,x), \qquad (5)$$

где $n=\overline{1,N}$ при граничных условиях третьего рода и $n=\overline{0,N-1}$ при граничных условиях второго рода. При априори заданном числе N членов ряда, известных собственных числах $\mu_n, n=\left\{\overline{1,N};\overline{0,N-1}\right\}$ и собственных функциях $g(\mu_n,x), n=\left\{\overline{1,N};\overline{0,N-1}\right\}$, определяемых структурой объекта, его коэффициенты $\bar{h}_n(\mu_n,\varphi)$ образуют вектор неизвестных параметров $\Delta=\left\{\bar{h}_n(\mu_n,\varphi)\right\}, n=\left\{\overline{1,N};\overline{0,N-1}\right\}$.

Для их определения используются полученные в N точках $x_i^*, i=\overline{1,N}$ экспериментальные температурные реализации $\theta(x_i^*,\varphi), i=\overline{1,N}$, которые позволяют на основе модального

представления записать замкнутую систему алгебраических уравнений, в базовом одномерном случае принимающую вид

$$\theta\left(x_i^*, \varphi\right) \approx \sum_n \bar{\theta}_n\left(\mu_n, \varphi\right) g\left(\mu_n, x_i^*\right), n = \left\{\overline{1, N}; \overline{0, N-1}\right\}; i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Система (6) решается относительно N временных мод $\bar{\theta}_n\left(\mu_n, \varphi\right)$ температурного поля, которые далее используются при формировании усеченной системы N обыкновенных дифференциальных уравнений на основе модального описания процесса

$$\frac{d\bar{\theta}_n\left(\mu_n, \varphi\right)}{d\varphi} \approx f\left(\mu_n, \bar{\theta}_n\left(\mu_n, \varphi\right), \bar{h}_n\left(\mu_n, \varphi\right), \varphi\right), n = \left\{\overline{1, N}; \overline{0, N-1}\right\}. \quad (7)$$

Полученные в результате решения (7) временные моды искомого воздействия $\bar{h}_n\left(\mu_n, \varphi\right)$ позволяют восстановить идентифицируемую величину в виде суммы N членов ряда ее разложения (5) по собственным функциям.

Предварительное решение задачи оптимального расположения температурных датчиков, минимизирующего в равномерной метрике отклонение аппроксимирующей температурной зависимости от результатов эксперимента, приводит к регулярной процедуре восстановления температурного состояния и идентифицируемого пространственно-временного воздействия, обеспечивающего уменьшение погрешности аппроксимации с ростом числа членов учитываемого ряда.

Тем самым, разработанные методы параметрической оптимизации во всех представленных случаях основываются на парамерическом представлении идентифицируемого воздействия $h = \{h(\varphi, \Delta), h(x, \Delta), h(\theta, \Delta), h(x, \varphi, \Delta)\}$, что позволяет на интервале идентификации на априори заданном компактном множестве при выбранном числе параметров аппроксимировать любую физически реализуемую функцию зависимостью соответствующего вида. Увеличение числа N приводит к уменьшению погрешности аппроксимации температурного поля, при этом для любого N сохраняется регулярный характер решения задачи.

На основе разработанного метода параметрической оптимизации решена совокупность всех основных видов прикладных обратных задач технологической теплофизики, в результате чего проведена идентификация базовых характеристик процессов нестационарной тепопроводности.

Решены граничные ОЗТ, позволяющие по результатам термометрирования на части поверхности тел или в отдельных доступных для измерений точках внутри тела определять условия теплообмена на поверхности (меняющиеся во времени плотности тепловых потоков или коэффициенты теплоотдачи) [13, 18]. Такая задача актуальна в ряде технологических процессов, таких как закалка, горячая штамповка деталей и других, при расчете необходимых термических режимов их обработки.

Определена величина суммарного теплового потока, содержащего радиационную и конвективную составляющие, с поверхности металлического изделия в процессе его индукционного нагрева при обработке давлением [18].

Проведена идентификация пространственно-временной плотности теплового потока, характеризующей граничный теплообмен, на основе дискретной информации о температурном поле, полученной в результате его измерения одномерными датчиками в отдельных точках по объему тела. Решение соответствующей двумерной граничной ОЗТ позволяет определить искомую плотность теплового потока в форме непрерывной пространственно-временной функции [17].

На основе решения коэффициентных обратных задач исследованы теплофизические свойства материалов, обладающих существенной нелинейностью, что выражается в зависимости

физических характеристик от температуры или пространственной координаты [12]. Найдены теплофизические характеристики материалов, в том числе, на больших температурных интервалах при высоких скоростях изменения температур, например в процессе закалки стали.

Проведена идентификация закона распределения внутренних источников тепла при индукционном нагреве металла, результаты которой лежат в основе решения задачи проектирования индукционных нагревателей, позволяющих реализовать необходимый тепловой режим с максимальной эффективностью [15].

Восстановлено неизвестное начальное распределение температуры в пределах пространственной области, заданной геометрическими размерами деталей, подлежащих термической обработке, информация о котором позволит осуществить процессы технологического нагрева с наименьшими потерями [14].

Решена обратная задача индукционного нагрева, позволяющая на основе информации о температурном состоянии нагреваемого изделия найти усредненную величину суммарной удельной мощности тепловых источников при известном законе их пространственного распределения и постоянном напряжении на индукторе [11].

Таким образом, разработанные методы параметрической оптимизации могут использоваться для теплофизических исследований широкого спектра процессов технологической теплофизики и приводят к конструктивным, обладающим требуемой точностью решений, результатам идентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А. Н., Кальнер В. Д., Гласко В. Б. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении.— М. : Машиностроение, 1990, 264 с.

2. Мацевитый Ю. М., Гайшун И. В., Борухов В. Т., Костиков А. О. Параметрическая и функциональная идентификация тепловых процессов. Проблемы машиностроения. — 2011. — Т. 14, № 3. — С. 40—47.

3. Лаврентьев М. М., Романов В. Г., Шишатский С. П. Некорректные задачи математической физики и анализа. — М. : Наука, 1980, 286 с.

4. Ozisik M.N., Orlande H.R.B. Inverse Heat Transfer: fundamentals and applications. - New York : Taylor, Francis, 2000, p. xviii+330.

5. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. — М.: Наука. Физматлит, 1983, 200 с.

6. Рапопорт Э. Я., Плешивцева Ю. Э., Дилигенская А. Н. Конструктивные методы оптимизации управляемых систем с распределенными параметрами // XVIII междун. конф. .Проблемы управления и моделирования в сложных системах.: сб. тр. конф. — Самара : ИПУСС РАН, СамГТУ, 2016. — С. 317—324.

7. Рапопорт Э. Я., Плешивцева Ю. Э. Метод параметрической оптимизации программных управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // .Пром-Инжиниринг.: труды II международной научно-технической конференции. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. — С. 200 — 204.

8. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975 – 568 с.

9. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1988. - 288 с.

10. Рапопорт Э.Я. Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.

11. Diligenskaya A., Mandra A. Determination of Internal Heat Power during the Induction Heating Based on Solution of Linear Inverse Heat Conduction Problem // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Т. 792. — С. 635—639.

12. Diligenskaya A. N., Rapoport E. Y. Method of minimax optimization in the coefficient inverse heat-conduction problem // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2016. Т. 89, № 4. с. 1008-1013.

13. Рапопорт Э. Я., Плешивцева Ю. Э. Специальные методы оптимизации в обратных задачах теплопроводности // Изв. РАН. Энергетика, 2002. № 5.- с 144-155.

14. Diligenskaya A. N. Solution of the retrospective inverse heat conduction problem with parametric optimization // High Temperature, 2018. Т. 56, № 3. с. 382-388.

15. Diligenskaya A. N., Rapoport E. Y. Analytical methods of parametric optimization in inverse heat-conduction problems with internal heat release // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2014. Т. 87, № 5. - с. 1126- 1134.

16. Дилигенская А. Н. Аналитическая идентификация пространственно-временного управления в обратных задачах теплопроводности на основе модального представления // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. — 2012. — № 4. — С. 31—38.

17. Рапопорт Э. Я., Дилигенская А. Н. Модальная идентификация граничного воздействия в двумерной обратной задаче теплопроводности // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. — 2018. — Т. 22, № 2. — С. 380— 394. Diligenskaya A.

18. Estimation of the heat flux density during the induction heating process based on the parametric optimization // Int. J. of Microstructure and Materials Properties. — 2016. — Т. 11, № 1/2. — С. 5—17.

V. СОВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-477-482

Кондрашкова Галина Анатольевна, Бондаренкова Ирина Владимировна, Сидельников Владимир Иванович

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ СОВРЕМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ

***Аннотация**: В предлагаемой статье рассматривается современное образование с точки зрения синергетического подхода как к открытой, неравновесной и нелинейной системе. Поэтому задачами исследования этой системы является возможность оценить аттрактор ее развития на примере современного инженерного образования с учетом влияния на него общества и государства. Этапы совершенствования такой системы с точки зрения синергетики позволяют надеяться на уменьшение энтропии, т.е. переход от хаоса к порядку, в области образования за последние годы и в перспективе до 2025 года.*

***Ключевые слова:** синергетика, система образования, междисциплинарность, трансдисциплинарность, мультидисциплинарность, синергетический подход, аттрактор, инновации.*

***Abstract**: The proposed article considers modern education from the point of view of synergetic approach as an open, non-equilibrium and non-linear system. Therefore, the objectives of the study of this system is the ability to evaluate the attractor of its development on the example of modern engineering education, taking into account the influence of society and the state. The stages of improvement of such a system from the point of view of synergetic allow us to hope for a decrease in entropy, i.e. the transition from chaos to order in the field of education in recent years and in the future until 2025.*

***Keywords**: synergetics, education system, interdisciplinarity, transdisciplinarity, multidisciplinarity, synergetic approach, attractor, innovations.*

Теория самоорганизации или синергетика сегодня представляется одним из наиболее популярных и перспективных междисциплинарных подходов при решении сложных когнитивных проблем. Термин «синергетика» (synergeia (греч.) – совместное действие, сотрудничество) был предложен в начале 70-х годов немецким физиком из Штутгарта Германом Хакеном и имеет два смысла: с одной стороны кооперативное действие элементов сложной системы; с другой – сотрудничество учёных разных областей знания [1,с.7].

Синергетика возникла на стыке различных научных школ. Это брюссельская школа И.Пригожина, рассматривающая самоорганизацию в физических и химических процессах; школа Г.Хакена, изучающая лазеры; школа А.А.Колесникова, изучающая синергетический подход в теории управления; советская школа В.И.Арнольда и Р.Тома, разрабатывающая математический аппарат для описания катастрофических процессов; школа А.А.Самарского и С.П.Курдюмова, строящая теорию самоорганизации на основе вычислительного эксперимента; биофизическая школа М.В.Волькенштейна и Д.С.Чернявского и др. [2, с. 770].

Это привело к тому, чтосинергетика начала оказывать всё большее влияние на разные сферы человеческой деятельности и вызывать всё больший интерес. В отличие от традиционных областей научного познания, ее интересуют общие закономерности эволюции систем любой

природы. Синергетика способна описывать их эволюцию на обобщённом языке. Это позволяет делать достояние одной области науки доступным пониманию представителям совсем другой области познания [3]. Сейчас этим подходом интересуются многие – от студентов до политиков, от менеджеров до активно работающих исследователей [4]. Таким образом, синергетика стала языком междисциплинарного общения, на котором говорят друг с другом физики, биологи, психологи, математики и другие специалисты.

Для обозначения новой теории самоорганизации в научных кругах сегодня используют термины «междисциплинарность», «трансдисциплинарность» и «мультидисциплинарность». Понятия эти достаточно близки друг к другу, однако имеют некоторые отличия.

«Междисциплинарность» можно понимать как своего рода перенос методов исследования и используемых моделей из одной научной дисциплины в другую.

Термин «трансдисциплинарность» обозначает такие исследования, которые идут «через» и «сквозь» различные дисциплины и даже выходят за пределы конкретных дисциплин.

В то время как «мультидисциплинарность» трактуется как характеристика такого исследования, когда предмет изучается одновременно с помощью нескольких научных дисциплин.

Если рассматривать теорию самоорганизации применительно к образованию, как важнейшей социальной системе, то следует подчеркнуть, что обучение направлено на развитие интеллекта, обладающего тезауросом теоретических и практических знаний разнообразных по профессиональной принадлежности и с использованием широкого круга моделей из разных научных дисциплин. В этом смысле можно для самоорганизации образования использовать термин «мультиинтеллектуальность». Действительно, сейчас обсуждаются вопросы: как и чему учить, поскольку знания быстро устаревают (компрессия времени по С.П.Капице), а понимание (интеллектуальное) способно осваивать новейшие фундаментальные и технологические инновации. Хотя о необходимости возрождения моды на интеллект и получение новых знаний провозглашалось еще в 2014 году [5, с. 116], но внедрение этой моды за пять лет не достаточно охватило наше общество. В этом состоит задача профессионального сообщества по привлечению синергетического подхода к совершенствованию образования.

Поэтому синергетику в образовании можно рассматривать в двух аспектах: можно говорить о синергетических подходах к образованию, синергетических способах организации процесса обучения и воспитания для обеспечения «мультиинтеллектуальности» будущих специалистов, а можно вести речь об образовании через синергетику, путем передачи и распространения синергетических знаний для достижения поставленных при обучении целей. В первом случае синергетика будет выступать как комплексный подход к образованию со специальной методологией, а во втором – как его содержание [6].

В образовании синергетический подход – это новый этап, на котором необходимо не только систематизировать накопленные методологические и теоретические наработки классического способа обучения студентов, использовать эти способы в различных сферах обучения путем выработки стандартных приемов решения исследовательских задач, но и разработать новые механизмы познанияэтих приемов, иными словами, обеспечить не только производство, но и адекватное воспроизводство синергетического знания [7, с. 171].

Опираясь на известные понятия: диссипативная система, аттрактор, порядок и хаос в саморегулирующихся системах открытого типа, можно утверждать, что пользуясь этими синергетическими понятиями, следует исследовать современное состояние образования.

Поскольку, действительно, образование, как социальная открытая развивающаяся система, являясь диссипативной системой, обладает свойствами открытости, неравновесности и нелинейности, можно проследить эволюцию образования на примере инженерной подготовки. Последняяпрошла большой исторический путь развития [5], в котором просматриваются изменения под влиянием не только внутренних, но и внешних сил, и которым, в определенной степени, присущ беспорядок, обычно оцениваемый энтропией.

Рассматривая влияние других систем: государства, общества и т.п., можно, некоторым образом, оценить порядок и хаос, к которому пришло инженерное образование в России после 1991 года. В результате, образование, наука и промышленность представляют собой не единый взаимосвязанный национальный комплекс, а являются множеством независимых друг от друга подсистем, включающихся в образовательную (научную, промышленную) компоненту глобальной мировой инновационной системы.

Поэтому в настоящее время, как в России, так и в странах Запада наблюдается, выражаясь языком синергетики, аттрактор, т.е. эволюция движения системы образования к некоторой упорядоченности.

Так в США развивается система подготовки специалистов, получившая название STEM[8], с переходом к разработке учебной программы под маркой K-12 STEM, которая предназначена для обучения, начиная с дошкольного[9]. Для этого в США создан Комитет при научно-технологическом совете для координации федеральных программ и мероприятий в области STEM-образования. К его полномочиям относятся [8]:

– координация действий федеральных агентств в сфере STEM-образования;

– разработка, внедрение и обновление каждые пять лет политики в области STEM-образования;

– анализ подходов к оценке эффективности программ и мероприятий, предназначенных для достижения перечисленных целей;

– создание и обновление списка федеральных программ в области STEM-образования, ведение документации по оценке эффективности подобных программ и мероприятий.

Для дальнейшего усовершенствования инженерного образования с целью удовлетворения требований работодателей и подготовки комплексных инженерных специалистов, способных создавать и осваивать современную инновационную технику, предусматривается разработка и внедрение международного проекта CDIOInitiative[10], в котором устанавливается консенсус между теорией и практикой в инженерном образовании[11].

В рамках инициативы CDIO созданы инструменты, которые могут быть адаптированы и внедрены в образовательную деятельность с учетом специфики конкретных образовательных программ [5, с. 64]. Одним из таких инструментов являются 12 стандартов CDIO.

Стандарты CDIO– это комплексный подход к инженерному образованию: набор общих принципов создания учебных программ, их материально-технического обеспечения, подбора и обучения преподавателей [9, 10].

В России ведется собственная большая работа по совершенствованию образования, в том числе и на примере инженерной подготовки современных специалистов, с учетом запроса работодателей [11, 12].

В последние годы государством, обществом и лично президентом РФ В.В.Путиным уделяется постоянное внимание сфере образования, а особенно инженерному образованию. Достаточно перечислить документы (№ 642 от 01.12.2016 года «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», Проект Стратегии развития инженерного

---

[8]STEM: Science (Наука) – Technology (Технология) – Engineering (Инженерное искусство) – Mathemstic (Математика).

[9]К этой программе (образование, начиная с детского сада и до 12 класса школы) присоединились Великобритания, Китай, Австралия, Корея и Тайвань.

[10]CDIO: Conceive (Планировать) – Design (Проектировать) – Implement (Производить) – Operate (Применять).

[11]К этой программе (в основном, для бакалавриата) присоединились более 100 вузов из более 30 стран.

образования в РФ на период до 2020 года, предлагаемые основные направления дальнейшего развития инженерного образования в РФ на период до 2020 года) и проанализировать ежегодные высказывания-пожелания Президента Российской Федерации по вопросам образования.

Так на заседании Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию 23 июня 2014 года отмечалось, что «… мы должны развивать кроме подготовки инженеров по эксплуатации высокотехнологичного оборудования, а также традиционных инженеров (конструкторов, технологов, расчетчиков, программистов, экономистов и т.д.) подготовку инженеров, качественно нового типа: инженеров-исследователей и разработчиков – так называемый инженерно-технологический спецназ – элитных инженеров, владеющих технологиями мирового уровня, например, технологиями суперкомпьютерного инжиниринга, передовыми производственными технологиями; инженеров-исследователей, способных решать, казалось бы, нерешаемые задачи, и обеспечивать инновационные прорывы в высокотехнологичных отраслях…» [13].

По-видимому, речь идет о подготовке специалистов с ученой степенью «кандидат инженерии».

Параллельно в профессиональном образовательном сообществе России идут поиски наиболее оптимальных форм подготовки научно-педагогических кадров: аспирантура и реформирование государственной системы научной аттестации [5, с. 190]. В настоящее время принят «Проект Стратегии развития инженерного образования в Российской Федерации на период до 2020 года». Он является первой частью разрабатываемой научным Советом «Стратегии развития инженерного образования на период до 2025 года и дальнейшую перспективу». Настоящая Стратегия предусматривает внедрение масштабной системной программы развития экономики нового технологического поколения, называемой цифровой экономикой [5, с. 196].

Реализация настоящей Стратегии осуществляется в несколько этапов, связанных с этапами развития экономики и бюджетной системы Российской Федерации. Для каждого из этапов устанавливаются показатели, отражающие ход и основные результаты реализации настоящей Стратегии. Так на этапе реализации в период с 2020 по 2025 год и в дальнейшей перспективе [5, с.111] формируются принципиально новые научно-технологические решения в интересах национальной экономики, основанные, в том числе, на природоподобных технологиях; реализуются меры, направленные на стимулирование перехода к стадии активной коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности и к масштабному созданию новых продуктов и услуг, основанных на технологиях, отвечающих на большие вызовы; обеспечивается увеличение объема экспорта технологий и высокотехнологичной продукции, в том числе посредством реализации Национальной технологической инициативы и поддержки национальных компаний при выходе на глобальный рынок.

Отрадно, что в Стратегии обращается внимание на следующие важные моменты:

– изменение структуры образовательного процесса с большим акцентом на практическую подготовку, в том числе через научно-исследовательскую работу в процессе обучения;

– мобильность преподавателей столичных вузов, обеспечивающая возможность преподавания и научной работы в региональных вузах страны;

– участие в подготовке обучающихся не только ученых, но и практиков, имеющих опыт работы с современными технологиями.

По первому пункту отмечаются сдвиги, заключающиеся в том, что в ряде школ, лицеев, колледжей, техникумов, вузов и других учебных заведений значительное внимание уделяется практической профессиональной подготовке обучающихся. Например, в Академии дополнительного профессионального образования (АДПО) в Санкт-Петербурге уже несколько лет осуществляется инновационная деятельность в виде профессионального обучения в

дополнительный год в старшей школе для возможности наряду с окончанием школы найти и совершенствовать избранную профессию для работы по приобретенной специальности

Важные задачи по развитию образования с точки зрения сочетания высшего образовательного уровня по математической, естественно-научной, физико-технической подготовке с профессиональными практическими навыками успешно решают госкорпорации и некоммерческие организации: РОСАТОМ, РОСТЕХ, РОСКОСМОС, РОСНАНО и некоторые другие [5, с. 199].

В ряде вузов страны используются контакты с научно-исследовательскими центрами, промышленными предприятиями и организациями при выполнении выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций с конкретными профессиональными задачами.

Однако массовое взаимодействие промышленных предприятий с вузами затруднено, по крайней мере, двумя обстоятельствами:

– в ключевых областях народного хозяйства иностранное присутствие составляет подчас до 80% и это кардинально мешает привлекать обучающихся к профессиональной подготовке на всех уровнях их обучения;

– нормальная производственная практика на всех этапах обучения невозможна из-за территориальной разобщенности мест подготовки специалистов с предприятиями и организациями по профилю подготовки обучающихся.

В заключении можно утверждать, что внедрение предлагаемых структурных и технологичных инноваций в образовательный процесс – это действие аттрактора, заключающееся в том, что он осуществляет как бы эволюционную детерминацию будущим предстоящим предлагаемым состояниям системы. Состояние еще не достигнуто, его не существует, но оно каким-то образом протягивает щупальца из будущего в настоящее, иначе в методологическом смысле взгляд на такой аттрактор аналогичен цели, как если бы избранная системой цель оказывается действенной. Поэтому успех в области развития образования во многом зависит от совместного действия с помощью синергетического подхода профессиональным сообществом изнутри системы и государства и общества в виде внешнего воздействия.

В этом направлении от Совета при Президенте Российской Федерации по науке и высшего образования предлагается в системе инженерного образования выделить синергетическую составляющую при подготовке инженеров, основанную на принципах междисциплинарности и мультидисциплинарности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климонтович Н.Ю. Без формул о синергетике. – Минск: Вышэйшая школа, 1986.– 223 с.

2. 2. Философия. Энциклопедический словарь. Под ред. А.А.Ивина. – М.: Гардарики, 2004. – 1072 с.

3. Данилов Ю.А. Роль и место синергетики в современной науке / Сайт С.П.Курдюмова «Синергетика» в Интернете по состоянию на 10.12.08: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://spkurdyumov.narod.ru/DANILOV.htm] (дата обращения: 22.05.2019 г.).

4. Малинецкий Г.Г. Синергетика – от прошлого к будущему / Сложность. Разум. Постнеклассика. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. 2012. № 1. С. 25-46.

5. Инженерное образование: опыт и перспективы развития в России / А.И.Рудской, А.И.Боровиков, П.И.Романов. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2018. – 224 с. – (Серия: Инженерное образование).

6. Мелихова О.П. Синергетика как общая методология современного образования в области наук о жизни. Синергетика и образование. Хрестоматия. Ижевск. 2003.С. 359-366.

7. Буданов В.Г. Методология синергетики в постнеклассической науке и в образовании. Изд. 3-е дополн. – М.: Издательство ЛКИ, 2009 – 240 с. (Синергетика в гуманитарных науках).

8. Report to the President. Prepare and inspire: K-12 education in science, technology, engineering, and math (STEM) for America's future. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.afterschoolalliance.org/documents/pcast-stemed-report.pdf(дата обращения: 22.05.2019 г.).

9. CDIO. 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cdio.org (дата обращения: 22.05.2019 г.).

10. Международный семинар по вопросам инноваций и реформированию инженерного образования «Всемирная инициатива CDIO»: Материалы для участников семинара (Пер. С.В. Шикалова) / Под ред. Н.М. Золотаревой и А.Ю. Умарова. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 60 с

11. 11.Рудакова И.В., Черникова А.В. Разработка модульных образовательных программ с учетом требований работодателей / Современные образовательные технологии. Сборник трудов XLIII научно-методической конференции. СПбГТИ (ТУ), СПб, 2016. С. 94-99.

12. Бондаренкова И.В., Черникова А.В. Новые подходы к обучению в ВУЗах / Современные технологии профессионального образования: проблемы и перспективы. Сборник трудов научно-методической конференции с международным участием. Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, 2014. С. 166-169.

13. Заседание Совета по науке и образованию: [сайт Президента России]. – Режим доступа: http://kremlin.ru/events/president/news/45962 (дата обращения:22.05.2019 г.).

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-483-487

Веселов Геннадий Евгеньевич, Лызь Александр Евгеньевич,
Лызь Наталья Александровна

Южный федеральный университет

ФАКТОРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТНОГО ОБУЧЕНИЯ В ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРОВ

Аннотация. *Статья посвящена проблеме внедрения технологии проектного обучения в инженерном образовании. Проанализированы возможности проектной деятельности в подготовке инженеров. Показано, что на эффективность проектного обучения и степень достижения планируемых образовательных результатов влияет три группы факторов, связанных, во-первых, с качеством организации проектной деятельности, во-вторых, с готовностью студентов, в-третьих, с внешними условиями деятельности и материально-техническими ресурсами.*

Ключевые слова: *Инженерное образование, проектные образовательные технологии, качество организации проектной деятельности, готовность студентов к проектной деятельности, образовательные результаты.*

Annotation. *The article is devoted to the problem of introducing technology of project training in engineering education. The possibilities of project activity in the training of engineers are analyzed. It is shown that the effectiveness of project training and the degree of achievement of the planned educational outcomes are influenced by three groups of factors related, firstly, to the quality of the organization of project activities, secondly, to the readiness of students, thirdly, to external conditions of activity and material and technical resources.*

Keywords: *Engineering education, project educational technologies, quality of organization of project activity, students' readiness for project activity, educational outcomes.*

Подготовка инженерных кадров ориентирована на формирование профессиональной компетентности, интегрирующей собственно профессиональные знания и умения, а также личностные и межличностные навыки (soft skills) выпускника. Это требует внедрения перспективных организационных форматов и компетентностно-ориентированных образовательных технологий [2]. Новые модели инженерного образования основаны на развитии информационных и коммуникационных технологий, расширении виртуального образовательного пространства, использовании проектных, интерактивных, личностно-развивающих образовательных технологий [5].

Один из наиболее распространенных в инженерном образовании подход CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate), нацеленный на подготовку выпускников, способных планировать, проектировать, производить и применять сложные инженерные объекты, постулирует необходимость активного, практического, а также интегрированного обучения, обеспечивающего освоение студентами дисциплинарных знаний и одновременное формирование необходимых личностных и межличностных компетенций, навыков создания объектов, процессов и систем [1]. Активное обучение предполагает вовлеченность студентов в образовательный процесс, использование заданий на осмысление теоретического материала, проведение групповых дискуссий, обратную связь со студентами по изучаемому материалу. Практическое обучение включает выполнение проектов по разработке и применению объектов и систем, моделирование и анализ реальных ситуаций профессиональной инженерной деятельности и т.п. Интегрированное обучение опирается на проблемно-ориентированные методы, на объединение работы в команде с заданиями по инженерной дисциплине, включает

одновременное обсуждение технических аспектов инженерной задачи и профессиональной этики [Там же]. Все эти виды обучения целесообразно реализовать посредством технологии проектного обучения. Такое обучение предоставляет наибольшие возможности в плане формирования умений планировать, проектировать, производить и применять объекты, процессы или системы, становления профессиональных, личностных и межличностных компетенций будущего профессионала, развития метакогнитивных способностей, а также обеспечивает вовлеченность в учебно-профессиональную деятельность, возможность самореализации и саморазвития [6, 9]. Кроме того, проектная деятельность студентов способствуют продвижению студентов от устоявшегося профессионального опыта к переднему краю науки и практики, включая их в освоение способов решения целостных профессиональных задач, в производство и трансляцию нового знания и новых подходов в профессиональной деятельности [4]. Не случайно в инженерном образовании проектное обучение приобретает все большее распространение, реализуя не только задачи формирования профессиональных умений и навыков проектной деятельности у студентов, но и закладывая основы выполнения реальных востребованных проектов в форме стартапов, приносящих коммерциализируемые результаты.

Под проектным обучением понимается:

– совместная деятельность преподавателей, внешних и внутренних консультантов и экспертов, заказчиков и исполнителей (обучающихся), направленная на создание уникального продукта, услуги или на формирование научно-технического задела, в результате которого помимо создания продукта достигаются образовательные результаты [8];

– образовательный подход, в рамках которого студенты разрабатывают востребованное практическое решение актуальных инженерных проблем, используют междисциплинарный подход и подход полного жизненного цикла проекта, под руководством наставников сотрудничают друг с другом и внешними участниками, благодаря чему достигают реальных конечных результатов [8];

– специальная организация самоуправляемой учебно-профессиональной деятельности малой группы студентов через совокупность поисковых, проблемных, творческих, оргдеятельностных методов, активизирующих познавательную, созидательную и коммуникативную деятельности, развивающих профессиональные умения и личностные качества обучающихся в процессе создания конкретного продукта [3].

Целесообразность использования технологии проектного обучения определяется ключевыми в подготовке инженера возможностями:

– развивать универсальные и профессиональные компетенции студентов в ситуациях целостной профессиональной деятельности;

– усиливать практическую составляющую обучения, обеспечивать применение студентами на практике полученных теоретических знаний;

– повышать мотивацию обучения и интерес студентов к профессии;

– обеспечивать индивидуализированный характер и гибкость образовательных траекторий путем предоставления студенту возможности самостоятельно выбирать темы, роль и степень участия в проекте;

– повышать конкурентоспособность выпускника за счет получения в вузе проектного и предпринимательского опыта, взаимодействия с работодателями, наличия портфолио реализованных проектов.

Данные возможности реализуются в полной мере только в случае обеспечения достаточного качества проектной деятельности студентов, ведущей к планируемым продуктовым и образовательным результатам.

Для того чтобы выполняемые студентами проекты приносили реальные продукты, необходимо выполнение следующих требований к процессу проектирования [8]:

– проектирование от проблемы, востребованность потенциальными пользователями; соответствие получаемого результата проекта реальным требованиям профессионального сообщества;

– реализация полного жизненного цикла проекта – от замысла до внедрения и использования (эксплуатации и утилизации);

– новизна решения;

– самостоятельность команды в принятии решений и реализации всех стадий проекта, учет ограниченности ресурсов, выявление рисков и путей их преодоления;

– осмысление и обсуждение образовательного результата.

На эффективность проектного обучения и степень достижения планируемых образовательных результатов влияет три группы факторов, связанных, во-первых, с качеством организации проектной деятельности, во-вторых, с готовностью студентов, в-третьих, с внешними условиями деятельности и материально-техническими ресурсами. Рассмотрим их последовательно.

Качество организации проектной деятельности определяется имеющимися в вузе и привлекаемыми кадровыми ресурсами. Необходима тщательная проработка организационных основ и содержания такой деятельности, обеспечение взаимосвязи выполняемых студентами проектов с реальными профессиональными задачами. Это достигается посредством взаимодействия с предприятиями реального сектора экономики и привлечения консультантов, заказчиков, экспертов. Кроме того, для организации проектного обучения необходимы преподаватели-наставники, которые, во-первых, обладают предметно-профессиональными компетенциями и опытом проектной деятельности в соответствующей сфере, во-вторых, организационно-управленческими компетенциями и готовностью к реализации роли наставника [4]. В управлении малой группой студентов (командой проекта) необходимо обеспечить направленность работы студентов в соответствии с указанными выше требованиями к процессу проектирования, а также поставленными задачами и графиком; сочетать саморегуляцию в группе с фасилитацией со стороны преподавателя: стимулировать самостоятельное мышление, принятие ответственных решений и рефлексию студентов, поддерживать мотивацию и сотрудничество, консультировать и помогать в преодолении трудностей.

Готовность студентов к проектной деятельности определяется наличием базовых профессиональных знаний, метакогнитивных умений, мотивацией учебно-профессиональной деятельности, а также умениями саморегуляции и коммуникации. Поскольку проектная деятельность обладает высоким уровнем сложности, целесообразна предварительная или сопровождающая теоретическая и практическая подготовка студентов к выполнению проекта. В практической подготовке наиболее эффективны такие предпроектные форматы, как мастер-классы для получения базовых навыков (например, сборки технических устройств, сбора первичных данных, измерений), тренинги личностных компетенций (например, командной работы, презентации результатов), проектные сессии с участием заказчиков. Задачей теоретической подготовки является формирование знаний о видах и особенностях проектов, этапах и характеристиках проектной деятельности. Что касается мотивации, то современные исследования свидетельствуют о сочетании престижно-материальных мотивов и личностной заинтересованности студентов технических направлений подготовки в освоении профессии [7]. В целом при наличии мотиваторов в процессе обучения (акцент на достижениях, привлекательность заданий, показ профессиональных перспектив и др.) возможно обеспечить вовлеченность студентов в проектную деятельность.

Использование технологии проектного обучения затрагивает не только образовательный процесс (использование новых форматов и педагогических технологий, введение в учебные планы модулей проектной деятельности, изменения в графике учебного процесса, расписании

занятий и пр.), но и **внешние условия**. При внедрении проектного обучения в вузах могут потребоваться: институциональные и управленческие изменения – модернизация образовательной модели, создание подразделений, курирующих проектную деятельность, появление новых структурных единиц (центров, лабораторий, мастерских), реализующих проектные форматы; кадровые изменения – привлечение специалистов-практиков, повышение квалификации преподавателей, обучение кураторов (наставников) проектов; коммуникационные изменения – появление новых каналов информации, проектных порталов и площадок [8].

Внедрение проектного обучения в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета показало, что оно позволяет получить следующие **образовательные результаты**:

– понимание основ проектной деятельности;

– интегрированные профессиональные знания и умения студентов, в т.ч. знания профессиональных требований, норм, стандартов;

– метакогнитивные навыки, умения получать и применять знания;

– системное междисциплинарное мышление;

– опыт решения целостных проблем;

– понимание взаимосвязи изучаемых дисциплин с практикой;

– интерес студентов к профессии, мотивация к овладению профессиональным опытом;

– умения самостоятельно ставить цели, проявлять инициативу, принимать решения в условиях неопределенности;

– компетенции самоорганизации, умения соблюдать сроки, доводить дело до конца;

– навыки анализа результатов и коррекции деятельности;

– умения работать в группе, коммуникативная компетентность студентов;

– умения публичного представления результатов работы;

– ответственность за конечный результат и за качество создаваемого продукта.

В заключение отметим, что низкая эффективность проектного обучения обусловлена недостатками проработки организационных основ и содержания проектной деятельности студентов; консерватизмом и нежеланием преподавателей перестраиваться под новый формат обучения; недостаточной готовностью студентов (отсутствие опыта проектной деятельности, низкая заинтересованность и мотивация, недостаток ответственности, умений работать в команде и пр.); отсутствием прочных связей вуза с реальным сектором экономики; неразвитостью материально-технической базы вуза. Проведенный анализ показывает сложность эффективного использования технологии проектного обучения и необходимость учета всего спектра факторов: кадровых, организационных, психолого-педагогических, материально-технических.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродер Р., Малмквист Й., Эдстрем К., Кроули Э., Остлунд С. Переосмысление инженерного образования. Подход CDIO. М.: ВШЭ, 2015. 540 с.

2. 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.

3. Лызь Н.А., Кибальченко И.А. Инженерное образование: цели, модели, методики обучения: учебное пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. – 93 с.

4. Лызь Н.А., Лабынцева И.С. Организация деятельности студентов в высшем образовании: учебное пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. – 125 с.

5. Лызь А.Е., Лызь Н.А. Переход к новым моделям образования в подготовке инженеров // VIII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. С. 440-444.

6. Лызь Н.А. Проектное обучение в компетентностно-ориентированной подготовке психологов // Современная образовательная психология в подготовке специалистов помогающих профессий: актуальные проблемы теории и практики оказания помощи другим: сборник научных статей / под ред. Э.В. Котляровой. – Могилев: МГУ имени А. А. Кулешова, 2019. – 300 с. С. 82–87.

7. Лызь Н.А., Нещадим И.О. Мотивация поступления в вуз как фактор компетентностно-ориентированного обучения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». 2018. Т. 10, № 1. С. 13–19.

8. Проектное обучение. Практики внедрения в университетах // Под ред. Л.А. Евстратовой, Н.В. Исаевой, О.В. Лешукова. – М., 2018. – 154 с.

9. Lyz N., Lyz A., Opryshko A. Person development technologies to enhance soft skills of engineering students // The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences. 2018. Volume LI, Pages 134–144.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-488-494

Бондаренкова Ирина Владимировна (1),Черникова Анна Владимировна (2)

1. Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
2. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация: *В статье затронуты вопросы интеграции в сфере высшего образования на разных уровнях, рассмотрены подходы к разработке образовательных программ с учетом требований стандартов, сочетания различных образовательных технологий, непрерывности обучения и академической мобильности. Приведены примеры реализации интеграционных процессов, изложены методические подходы к оценке качества инженерной подготовки, даны основные инструменты наглядного представления результатов освоения образовательных программ.*

Ключевые слова: *интеграция, уровни интеграционных процессов в системе высшего образования, проектная работа, академическая мобильность, модуль мобильности, электронное обучение и дистанционные образовательные технологии.*

Abstract: *The article addresses the issues of integration in higher education at different levels, approaches to the development of educational programs are considered, taking into account the requirements of standards, a combination of various educational technologies, learning continuity and academic mobility. Examples of the implementation of integration processes are given, methodological approaches to assessing the quality of engineering training are set forth, and the basic tools for visualizing the results of learning programs are given.*

Key words*: integration, levels of integration processes in higher education, project work, academic mobility, mobility module, e-learning and distance learning technologies.*

Интеграция (от лат. integratio – восстановление, восполнение, integer – целый) – понятие, означающее процесс, или действие, имеющие своим результатом целостность, объединение, соединение, восстановление единства. С позиций философии, как системообразующей науки, интеграция – сторона процесса развития, связанная с объединением в единое целое ранее разнородных частей и элементов.

При понимании интеграции как состояния используют синонимы целый, единый, нераздельный, связанность, связь; при понимании интеграции как процесса – объединение, связывание, сближение, приспособление, сотрудничество, единение, сплочение.

Под интеграционными процессами в сфере образования понимается совокупность последовательных системных действий, направленных на объединение отдельных информационно-образовательных сред в единое проблемное поле с целью подготовки специалистов высокого уровня компетентности в различных сферах профессиональной деятельности [1, с.284 – 285]. Интеграционные процессы в образовании базируются на комплексном использовании системного, синергетического, гносеологического, деятельностного и информационного подходов, которые обеспечивают активное вовлечение студентов в образовательный процесс, ориентированный на результат, и установку на получение новых знаний, самореализацию и саморазвитие.

Интеграционные процессы в системе высшего образования проявляются на разных уровнях.

Макроинтеграция – интеграция системы высшего образования в России в мировое образовательное пространство (Болонский процесс, интеграционные процессы в рамках различных объединений стран и др.).

Мезоинтеграция – внутрисистемная интеграция высшего образования, проявляющаяся в создании образовательных структур разной подчиненности и развитие системы сетевого обучения (федеральные университеты, национальные исследовательские университеты и другие образовательные структуры).

Микроинтеграция – проявление интеграционных связей внутри образовательных организаций (междисциплинарные связи, модульное обучение, сочетание различных образовательных технологий, формирование межпредметного образовательного пространства, интеграция воспитательного и образовательного процессов и т.д.).

Рассмотрим интеграционные процессы на каждом из уровней.

Традиционно инженерное образование базировалось на двух основных принципах – глубокая фундаментальная подготовка и обучение на основе последних достижений науки. Вместе с тем новые экономические условия и реалии сегодняшней жизни ставят перед высшей технической школой ряд новых задач по совершенствованию инженерного образования, внедрения новых технологий, использования современных методик обучения.

Основная причина, которая приводит к необходимости изменения образовательного вектора – переход к новой образовательной парадигме, методологической основой которой считается компетентностный подход.

Идея компетентности была призвана решить проблему подготовки высококвалифицированных специалистов и подразумевала не только определенное качество образования, но и возможности его реализации в профессиональной деятельности, т.к. компетенции являются связующим звеном между возможностями выпускника и условиями их реализации после трудоустройства.

Десятилетний опыт работы по ФГОС, ломка четко выстроенной системы 5-6-ти летней подготовки инженеров, колоссальная работа профессорско-преподавательского состава над учебно-методическими документами (рабочие программы дисциплин, учебно-методические комплексы и фонды оценочных средств), дают основание судить о недостатках стандартов и сложностях, которые возникают при разработке основных образовательных программ, особенно в настоящее время, когда для ряда направлений уже введены в действие актуализированные ФГОС ВО 3++, разработанные с учетом профессиональных стандартов, а для других направлений еще действуют ФГОС ВО.

При этом возникает противоречие, т.к. в соответствии с ФГОС ВО предполагается возможность реализации индивидуальных образовательных траекторий за счет формирования одинакового набора профессиональных компетенций, но привязанных к разным объектам деятельности, а при ориентации на конкретные профессиональные стандарты (при введении в действие ФГОС ВО 3++) такая возможность исключается.

Однако, следует также отметить расширение свободы образовательных организаций высшего образования при формировании основных образовательных программ (далее – ООП) на основе всех действующих ФГОС, которое связано с такими нововведениями, как:

отсутствие учебных циклов и перечня изучаемых дисциплин (кроме обязательных в минимальном количестве);

формирование компетенций по трем группам – общекультурные (или универсальные), общепрофессиональные и профессиональные, в соответствие с видами деятельности, на которые ориентирована ООП;

возможность применения дистанционных образовательных технологий и электронного обучения.

Основным противоречием между требованиями образовательного стандарта и формой документа об образовании является то, что в процессе освоения основной образовательной

программы ВУЗ должен обеспечить возможность формирования и проконтролировать сформированность всех компетенций (по уровням освоения), на которые ориентирована ООП, а в Приложении к диплому указываются дисциплины и традиционные оценки (хотя во многих образовательных организациях приняты иные шкалы оценивания). Возникает задача дисциплинарно-компетентностной интеграции.

Очевидно, что в процессе обучения компетенции в принципе не могут сформироваться окончательно, а уж проверить их сформированность в отрыве от производственной деятельности вообще не представляется возможным. Окончательный вывод о том, обладает ли выпускник определённым набором компетенций, на наш взгляд, может и, что самое главное, должен делать только работодатель после определенного времени работы выпускника (например, после первого года работы по окончании ВУЗа).

Кроме того, ВУЗы оказываются в непростой ситуации: количество компетенций, предписанных ФГОС, велико, и произвести оценку сформированности каждой из них в ограниченное время проведения ГИА чрезвычайно сложно. Практическое решение этой проблемы может быть достигнуто, во-первых, путём выбора наиболее экономичных методов оценки сформированности компетенций и, во-вторых, за счёт оценки сформированности компетенций на различных этапах ее формирования при освоении образовательной программы. При этом подтверждением того, что обучающимися освоены компетенции на требуемом уровне, является полностью выполненный ими учебный план, в противном случае обучающиеся к ГИА не допускаются в соответствии с требованиями нормативных актов.

Следует учитывать, что главная задача ВУЗа – обеспечение качества подготовки специалистов и качества контроля результатов освоения основных образовательных программ при соблюдении требований стандарта.

Результаты, полученные при проведении различных контрольных мероприятий, предлагается представлять по следующим показателям: по отдельной дисциплине, по компетенции, по группе компетенций, по образовательной программе в целом. А для получения наглядной оценки, указанные показатели формировать как итоговую компетентностную модель выпускника в виде диаграммы.

Так, компетентностная модель результатов освоения отдельной компетенции для каждого студента может быть представлена через портрет в виде набора диаграмм «Знает», «Умеет», «Владеет» (рисунок 1).

Например, для оценивания результатов освоения ОК-2 (способностью использовать на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом) можно использовать следующие индикаторы достижения сформированности компетенции (ИД):

ИД-1 - разрабатывает концепцию исследования/проекта по определенной проблематике, формулирует цель, задачи, актуальность, значимость и ожидаемые результаты;

ИД-2 - разрабатывает сетевой график проекта и систему контроля выполнения работ;

ИД-3 - обобщает и критически оценивает научные исследования в профессиональной сфере;

ИД-4 - анализирует, интерпретирует и представляет результаты исследований;

ИД-5 - предусматривает конечные результаты индивидуальных и коллективных решений;

ИД-6 - осуществляет организацию и планирование работы в команде.

Тогда, проверив освоение каждого индикатора с помощью фондов оценочных средств [2, с.40, 3, с.137] по дисциплинам, участвующим в формировании ОК-2 (например, по направлению «Управление в технических системах» такими дисциплинами могут быть Основы научного исследования, Управление проектами, Управление качеством, Научно-исследовательская работа магистра), получаем портрет освоения компетенции отдельным студентом.

Кроме того, дополнительно каждой дисциплине можно присваивать весовые коэффициенты с учетом вклада в формирование конкретной компетенции в рамках образовательной программы.

Аналогично можно сформировать модель, которая бы отражала результаты проверки сформированности нескольких компетенций, например, при проведении тестирования в период государственной аккредитации. Причем можно получать как индивидуальные портреты обучающихся, так и результирующий документ по группе студентов (потоку, контингенту, в целом по направлению подготовки) в виде паспорта проверки сформированности компетенций.

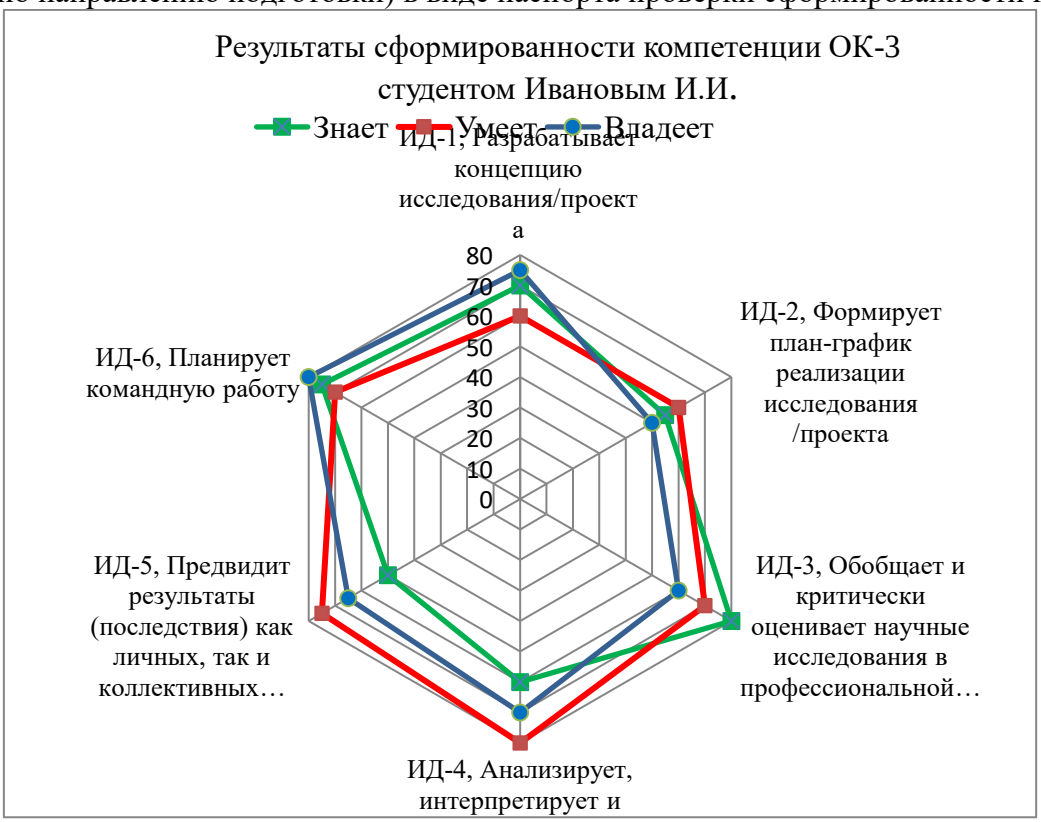
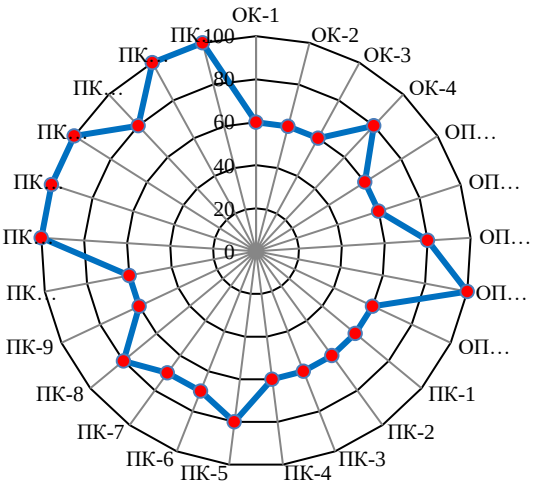


Рисунок 1 - Портрет освоения компетенции студентом

Если в ходе обучения проводить проверку сформированности компетенций на завершающем этапе их формирования, а также использовать оценки сформированности, полученные на ГИА, то общая интегральная оценка может быть представлена как диаграмма, отражающая итоговую сформированность компетенций выпускника. Примеры диаграммы представлены на рисунке 2.



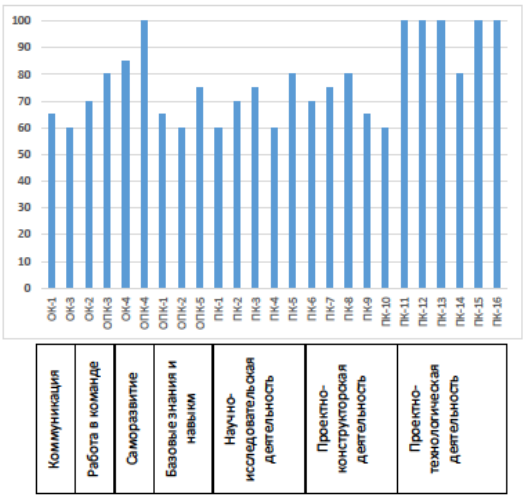


Рисунок 2 – Примеры визуализации сформированности компетенций выпускника

Такая модель является наглядной и удобной не только для образовательных организаций, но и для работодателей.

Следует задуматься об изменении формы приложения к диплому (или добавлении к нему документа), в котором вместо списка изученных дисциплин с указанием оценок будет присутствовать список компетенций с указанием степени их сформированности [4, с.92 – 93].

Сегодня в системе высшего профессионального образования, ориентированного на дисциплинарное изучение и блочное построение дисциплин, трудно создать у студентов современное целостное представление о науке. Для решения этой задачи сторонники синергетического подхода предлагают разработку интегрированных ООП, включающих комплексные дисциплины, нацеленные на глобальные проблемы современности или реализацию модульного обучения.

Интересным решением при таком подходе становится разработка ООП бакалавриата, основной единицей которой является не дисциплина, а модуль, объемом не менее 10 зачетных единиц, ориентированный на формирование группы компетенций. Тогда вся ООП состоит из 10-15 теоретических модулей, модуля практики и модуля ГИА. В этом случае облегчается процедура перевода и восстановления обучающихся, т.к. зачет результатов обучения будет проводиться по компетенциям.

Еще одним интересным примером реализации модульного обучения является включение в основную образовательную программу так называемого модуля мобильности.

Модуль мобильности – учебный цикл в рамках образовательной программы, представляющий дополнительную образовательную траекторию для обучающихся сверх подготовки по основному образовательному направлению, относится к вариативной части ООП и реализуется как выбор обучающимися ряда дисциплин из перечня рекомендуемых.

В Санкт-Петербургском Политехническом университете (СПбПУ) модуль мобильности реализуется с использованием ЭО и ДОТ на портале «Открытый Политех». Для программ бакалавриата и специалитета его объем составляет 10 зачетных единиц, для программ магистратуры – 5 зачетных единиц.

Электронный информационно-образовательный проект «Открытый Политех» объединяет в себе открытые образовательные, научно-образовательные ресурсы и является основной точкой доступа ко всем открытым информационно-образовательным ресурсам СПбПУ.

Модуль мобильности ориентирован на формирование дополнительной компетенции «Способен использовать возможности принципа мобильности для расширения сферы профессиональной деятельности с учетом личностных и профессиональных потребностей».

Следует отметить, что при наличии в ООП модуля мобильности программа легко интегрируется с родственной образовательной программой при реализации сетевого обучения,

академической мобильности, при реализации модели сетевого взаимодействия образовательных учреждений среднего профессионального и высшего образования.

На микроуровне интеграционные процессы можно рассматривать как сочетание различных педагогических приемов, образовательных технологий и т.п.

Примером такого подхода может стать дисциплина Основы проектной деятельности (ОПД), которая ориентирована на использование знаний, умений и навыков, полученных в ходе обучения, для постановки и решения практических задач, в том числе требующих коллективной работы студентов, включая межинститутскую.

В соответствии с Образовательной политикой СПбПУ [5] и стандартами, разработанными университетом самостоятельно (СУОС) дисциплина изучается студентами бакалавриата всех направлений подготовки на 2 курсе в 4 семестре. Компетенции, вклад в формирование которых вносит ОПД, относятся к универсальным компетенциям, т.е. единым для всех направлений бакалавриата:

Данным компетенциям соответствуют индикаторы достижения прописанные в СУОС, которые сопрягаются со знаниями, умениями, владениями (действиями), прописанными в рабочей программе дисциплины.

Укрупненно индикаторы в рамках каждой компетенции можно сгруппировать следующим образом (таблица 1) [6, с.61]:

Таблица 1 – Связь компетенций и укрупненных индикаторов

Компе-тенция	Формулировка компетенции	Индикаторы
УК-2	способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм и имеющихся ресурсов и ограничений	Формулировка задач, обеспечивающих достижение цели Проектирование решения конкретной задачи Представление результатов
УК-3	способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовать свою роль в команде	Командная работа Лидерство
УК-1	способен осуществлять поиск, критический анализ информации, применять системный подход для решения поставленных задач	Поиск информации Анализ информации Системный подход к решению поставленных задач
УК-4	способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном(-ых) языках	Коммуникация Информационно-коммуникационные технологии
УК-6	способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни.	Активность Личный вклад (адекватная личная оценка)

Из таблицы видно, что дисциплина позволяет обеспечить формирование различных навыков, от традиционных для образовательного процесса (поиск информации, владение информационно-компьютерными технологиями) до социально-значимых (командная работа, активность).

Кроме того, важным является тот факт, что команды формируются из студентов разных направлений подготовки, иностранных и российских граждан, «технарей» и «гуманитариев».

Главное, желание студента реализовать идею, предложенную преподавателем – куратором проекта или придуманную самим обучающимся.

Еще одним примером сочетания различных образовательных технологий является внедрение электронного обучения (ЭО) в различных формах: поддержка традиционного очного и заочного обучения, новый уровень развития дистанционного обучения, повышение квалификации преподавателей и т.п. Главными проблемами внедрения ЭО во всех учебных заведениях являются следующие: кадровое обеспечение ЭО, создание качественного учебно-материального обеспечения, нормативно-правовая основа ЭО, проблема авторских прав.

Однако, для выполнения требований образовательных стандартов, выживания в условиях жесткой конкуренции технических ВУЗов, привлечения абитуриентов из удаленных регионов, обеспечения возможности обучаться людям с ограниченными возможностями здоровья, внедрение и использование электронного обучения (ЭО) и дистанционных образовательных технологий (ДОТ) становится необходимым условием.

В завершении следует отметить другие задачи и формы интеграционных процессов в высшем образовании:

поиск и апробация путей повышения качества образования на основе широкого привлечения общественных и профессиональных организаций для профессионально-общественной и международной аккредитации образовательных учреждений, а также изменения системы государственной аккредитации;

усиление связи образования, науки и производства на основе интеграции вузов и предприятий через создание базовых кафедр и специальных факультетов на предприятиях;

усиление связи воспитания и образования;

повышение роли независимой системы оценивания качества образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скибицкий Э.Г. Интеграционные процессы в системе высшего профессионального образования/ Э.Г.Скибицкий, В.В.Егоров // Влияние модернизации общественных и корпоративных финансов на структуру и содержание программ непрерывного профессионального образования в области экономики и менеджмента: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: под общей редакцией Н.В. Фадейкиной. –2012.– С.284–294.

2. Черникова А.В., Денисенко С.Н. Разработка фондов оценочных средств для контроля результатов освоения основных образовательных программ высшего образования. // Современные подходы к оценке качества образования: сб. тр. XLV национальной научно-методической конференции СПбГТИ(ТУ), СПб, 2018. – С.39– 45

3. Рудакова И.В., Черникова А.В. Формирование фонда оценочных средств текущего и промежуточного контроля. Сборник трудов XLII научно-методической конференции «Обеспечение высокого качества образования – потребность государства и общества», СПб, СПбГТИ(ТУ), 2015. – С.136– 139

4. Щепинин В.Э., Виноходов Д.О. Итоговое оценивание сформированности компетенций // Обеспечение высокого качества образования – потребность государства и общества: сб. тр. XLII науч.-метод. конф. СПб: СПбГТИ (ТУ), 2015. – С.85– 93.

5. Образовательная политика в части управления и реализации моделей образовательных программ высшего образования, утверждена решением Ученого Совета СПбПУ от 25.01.2016, протокол №1.

6. Итс Т.А., Редько С.Г., Черникова А.В., Щепинин В.Э. Формирование компетентностной модели результатов обучения по отдельной дисциплине. Система оценки квалификации в развитии вузовского образования России и зарубежных стран. Материалы Российской научно-методической конференции с международным участием, Екатеринбург, 2018. – С.60– 63.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-495-499

Кибальченко Ирина Александровна, Дудко Сергей Анатольевич,
Угреватова Татьяна Анатольевна, Онищенко Михаил Валерьевич,
Чумичев Владимир Сергеевич

Южный федеральный университет

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАЗВИТИЯ ПОНЯТИЙНОГО МЫШЛЕНИЯ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ

Аннотация. *Статья посвящена развитию понятийного мышления будущих инженеров в процессе обучения. В качестве технологического способа развития понятийного мышления студентам предлагалась разработка диагностического набора слов, характеризующих поле понятия "образование", их категоризация. Цель исследования - разработка студентами развивающих и диагностических текстов с ключевым словом "образование". Основная задача состояла в обобщении студентами учебной информации и выходе на уровень понимания содержания понятий (на примере понятия "образование"). Решение этой задачи позволит не только выявить особенности концептуального стиля студентов, но и создать условия для развития их понятийного мышления.*

Ключевые слова: *стиль концептуализации, понятийное мышление, диагностический текст, развитие, студенты, будущие инженеры.*

Annotation. *Given article is devoted to the development of conceptual thinking of future engineers during the learning process. As a technological method of development of conceptual thinking students were offered the working-out of a diagnostic set of words, which characterize the field of the concept of "education", their categorization. The aim of the research is the development by students of enriching and diagnostic texts with the key word "education". The central problem consisted in generalization of educational information and achieving the level of understanding of the concept contents (using the example of the concept "education"). The solution of this problem will allow not only to bring to the light the features of the conceptual style of students, but also to create conditions for the development of their conceptual thinking.*

Keywords: *conceptualization style, conceptual thinking, diagnostic text, development, students, future engineers.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-013-00029 А

Современный профессионал, это человек, который обладает системой узко-профессиональных (hardskills) и универсальных компетенций (надпрофессиональных, softskills). Развитие этих компетенций приобретают особую актуальность в инженерной сфере. Изменения в современных образовательных стандартах определили необходимость развития универсальных, метапредметных компетенций, способствующих успешности личности как с точки зрения ее профессионализма, так и с точки зрения ее индивидуальных интеллектуально-личностных ресурсов.

В условиях традиционного вузовского обучения успешность студентов связана с уровнем интеллекта и понятийными способностями, которые вносят большой вклад в прогнозирование их реальных достижений [5].

Развитие понятийного мышления студентов в период молодости сопряжено с развитием таких характеристик, как ответственность, обязательность, что обусловливает их когнитивную зрелость, способность совладать с разного рода трудностями [3]. Понятийное мышление и мыслительные операции являются предиктором способности ориентироваться в различных формах теоретического знания, саморефлексии и адекватной оценки своих интеллектуальных

качеств, самостоятельного поиска новых идей, понятийных способностей, которые играют ведущую роль среди когнитивных способностей разного типа.

Уточним, что М.А. Холодная выделяет три вида понятийных способностей (*семантические* (усвоение, хранение и актуализация содержания словесных знаков); *категориальные* (выделение и оперирование категориальными признаками разной степени обобщенности); *концептуальные* (порождение новых ментальных содержаний) [7, 8, 9]. Высокий уровень сформированности концептуальных структур является кристаллизующим фактором способности к концептуализации, посредством чего осуществляется актуализация, организация и проектирование интеллектуально-личностных ресурсов и опыта студентов, который приобретает смысл, ценностную ориентированность, значение, то есть ресурсную роль. В данной ситуации проявляется «конструктивное начало личности» [2], осуществляется структурирование и моделирование ресурсов в образовании посредством активации и интеграции разных форм опыта студентов [3].

Понятийная и компетентностная оснащенность студентов выполняет роль средства развития личностной и профессиональной успешности студентов, в связи с чем актуальна и целесообразна гуманитарная образовательная парадигма, предполагающая свободу выбора студентов для реализации их интеллектуальных и личностных ресурсов, сотворчество всех участников образовательного процесса.

Анализ возможностей образовательных технологий в современном инженерном образовании свидетельствует о том, что образование должно быть нацелено на подготовку инженера новой формации, готового работать в новых условиях, способного совершенствовать инженерную деятельность, создавать будущее[1]. В связи с этим в процессе изучения дисциплин целесообразен задачный подход, направленный на использование способов разработки студентами диагностических текстов (стимулов) для изучения и развития понятийного мышления при координационной функции преподавателя. Известно, что в информационной структуре поля учебных задач заключены соответствующие виды знаний и умений обучающихся. Под способом нами понимается процесс субъективной переработки студентами учебного задания, который характеризует индивидуальную избирательность студента к проработке учебного материала, продуктивность использования знаний.

Так при изучении дисциплины "Методики профессионально-ориентированного обучения" студентам были предложены проектные задания, направленные на развитие понятийного мышления. При использовании таких заданий происходит обеспечение движения к функциональным новообразованиям субъекта к обогащению его интеллектуально-личностного потенциала[4].

Проектное задание направлено на разработку учебного текста для изучения и развития стиля концептуализации. Теоретическим основанием для разработки текста стало содержание методики диагностики узости/широты диапазона эквивалентности «Свободная сортировка объектов» (Gardner, Holzman, Klein, Linton, Spence) и модификация методики свободной сортировки объектов, предложенная В. Колгой [6].

Аналитический (артикулированный, структурированный, дифференцированный) стиль концептуализации характеризует способность выделять отдельные элементы воспринимаемой ситуации и устанавливать между ними связи. Иначе говоря, студенты с аналитическим концептуальным стилем демонстрируют способность выделять части организованных полей как дифференцированные и организовывать неструктурированные поля в связанные целостности. Такая способность называется способностью осуществлять анализ через синтез.

Синтетический (неаналитическпй, неструктурированный, недифференцированный) стиль концептуализации характеризует способность видеть происходящее в «общих чертах» на основе нечеткого (смутного) общего впечатления о понятии, объекте, ситуации при фактическом отсутствии преобразования поступающей информации в форме ее анализа и синтеза [6].

Организационные условия проектного задания:

– работа осуществлялась в группах;

– создавались группы разработчиков диагностического текста (стимульного материала) (1 или несколько человек), экспертов (для экспертизы стимульного материала), респондентов (для апробации стимульного материала).

Студенты получали информацию, что задание не имеет единственно правильного решения, так как каждый студент может формировать семантическое поле и группы, исходя из собственного учебно-познавательного опыта.

При обработке результатов показателями диапазона эквивалентности являются следующие:

1) количество выделенных групп;
2) количество объектов в наибольшей по объему группе;
3) количество групп, состоящих из одного объекта.

Чем больше выделенных групп, тем уже диапазон эквивалентности (соответственно, выше понятийная дифференциация).

Критерии оценки основания каждой группы слов:

0 баллов – формальное или тематическое название группы;

1 балл – четкое категориальное названии группы (М.А.Х.).

Средний показатель "0" отражает синтетичность концептуального стиля.

Средний показатель "1" отражает аналитичность концептуального стиля.

В процессе работы со студентами было определено ключевое слово "образование" для изучения и развития их стиля концептуализации.

Работа над проектным заданием проводилась в несколько этапов, направленных на разработку набора слов (стимульного материала) по ключевому слову, определяющих поле этого понятия; формирование групп из этих слов - категоризацию; описание ключа для обработки результатов.

На первом этапе (предварительном) студент-разработчик (Дудко С.) выделил ряд слов, входящих в категорию «образование»:

изучение, исследование, опыт, студент, школа, институт, знание, квалификация, дисциплина, предмет, совершенствование, библиотека, улучшение, концепция, культура, система, воспитание, наука, прогресс, развитие, доступность, академия, обучение, учитель, урок, сессия, престиж, декан, грамотность, интеллект, качество, ступень, диплом, отчет, статья, теория, программа, планирование, обязательность.

Полученные слова были разделены на группы, объединённые по общему признаку на взгляд автора-разработчика. А именно:

1) Воспитание, обучение – **функции образования.**
2) Сессия, диплом, отчет, статья, оценка – **проверка.**
3) Урок, опыт, теория, знание, исследование – **информация.**
4) Наука, прогресс, развитие, улучшение – **новизна.**
5) Учитель, декан, студент – **роль.**
6) Система, ступень, квалификация – **структура.**
7) Школа, институт, академия, библиотека – **организация.**
8) Доступность, качество, мобильность, обязательность – **требования.**
9) Планирование, программа, концепция – **стандарт.**
10) Престиж, грамотность, интеллект, культура - **ученость.**
11) Дисциплина, изучение, предмет, совершенствование–**обучение.**

В результате получено 39 слов и 11 групп.

На втором этапе (корректировочном) разработанный диагностический текст (стимульный материал) был представлен группе учащихся, состоящей из 7 студентов-экспертов. В процессе обсуждения стимульного материала экспертами в него был внесен ряд уточнений, а именно:

– добавлено 15 новых слов (эрудиция, тестирование, гуманитарное, физика, экономическое, специалист, химия, ведомость, магистр, техническое, зачет, биология, диссертация, бакалавр, начальное);

– удалены 2 слова из первоначального варианта (изучение, отчет);

– добавлены 4 новые группы;

– отредактированы 3 группы.

Итогом второго этапа работы над проектным заданием был получен новый набор слов, относящихся к понятию "образование":

эрудиция, начальное, опыт, тестирование, исследование, гуманитарное, студент, физика, школа, институт, знание, квалификация, дисциплина, предмет, совершенствование, экономическое, библиотека, улучшение, специалист, концепция, культура, химия, система, воспитание, наука, прогресс, ведомость, развитие, доступность, академия, обучение, учитель, урок, сессия, магистр, престиж, декан, техническое, грамотность, интеллект, зачет, качество, ступень, диплом, отчет, статья, теория, биология, программа, диссертация, планирование, обязательность, бакалавр.

Получен новый список групп:

1) Воспитание, обучение – **функции образования.**
2) Сессия, тестирование, зачет, оценка – **проверка.**
3) Урок, опыт, теория, знание, исследование – **информация.**
4) Наука, прогресс, развитие, улучшение – **новизна.**
5) Учитель, декан, студент – **роль.**
6) Система, ступень, квалификация – **структура.**
7) Школа, институт, академия, библиотека – **организация.**
8) Доступность, качество, мобильность, обязательность – **требования.**
9) Планирование, программа, концепция – **стандарт.**
10) Престиж, грамотность, интеллект, культура - **статус.**
11) Дисциплина, изучение, совершенствование –**обучение.**
12) Начальное, экономическое, техническое, гуманитарное – **профиль образования.**
13) Специалист, бакалавр, магистр – **степень.**
14) Химия, биология, физика – **предмет.**
15) Диплом, статья, ведомость, диссертация - **отчет.**

В результате получено 52 слова и 15 групп.

Таким образом, количество слов увеличилось на 33%, количество групп - на 36%, что отражает повышение понятийной дифференциации у студентов.

Используя угловое преобразование Фишера (Критерий φ*), получены значимые различия между результатами первого и второго этапа работы:

$$\varphi^*_{эмп} = 7.479, \text{ при } p \leq 0{,}01.$$

На третьем этапе выполнения проектного задания отредактированный стимульный материал был предложен группе студентов для апробации с предложением сгруппировать слова по своему усмотрению.

В результате были получены два вида групп:

– группы, совпавшие по названию с мнением автора-разработчика и экспертов (с частотой встречаемости от 2 до 43);

– группы-спецификации, расширяющие представление о семантическом поле понятия "образование"(с частотой встречаемости от 1 до 3): учебные заведения; учебный процесс; этапы обучения; оценка знаний; естественные науки; ступень обучения; направление; документация; контроль; разработка; категории знаний; отчетность; уровень; характеристики образования.

Используя угловое преобразование Фишера (Критерий φ*), получены значимые различия между результатами категоризации, совпавшими с "ключем" и группами-спецификациями, уточняющими семантическое поле понятия "образование" на этапе апробации.

$\varphi^*_{эмп} = 5.735$, при $p \leq 0{,}01$.

Полученные результаты отражают поэтапное изменение в стилях концептуализации у студентов в процессе учебных занятий.

В процессе работы были получены следующие **выводы:**

Возможности образовательных технологий в современном инженерном образовании, нацеленном на подготовку инженера новой формации, то есть понимающего и интеллектуально развитого, расширяются посредством задачного подхода и задач (заданий), направленных на развитие понятийного мышления как предиктора способности ориентироваться в теоретическом знании, саморефлексии, адекватной оценки своих интеллектуальных качеств и т.д.

Использование в содержании образования дисциплин заданий, предполагающих авторство студентов, субъективную переработку учебного задания, создает условия для формирования таких функциональных новообразований у студентов, как аналитический концептуальный стиль.

В процессе работы студенты демонстрируют поэтапное развитие способности выделять отдельные характеристики понятия, устанавливать между ними связи, то есть осуществлять анализ через синтез.

Подтверждение полученных результатов планируется при разработке учебных текстов (заданий), направленных на развитие понятийных категориальных способностей у студентов.

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) Калашникова С.А. Личностные ресурсы как интегральная характеристика личности // Молодой ученый. – 2011. – №8. – Т.2. – С. 84–87.

3) Кибальченко, И.А. Интеллектуально-личностный ресурс субъекта развития: теоретические основы: монография / Кибальченко И.А., Эксакусто Т.В., Истратова О.Н.; Южный федеральный университет. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 160 с.

4) Толочек В.А. Личностное и профессиональное развитие субъекта: способности, профессионально важные качества и компетентность, ресурсы и потенциал // Современные тенденции развития психологии труда и организационной психологии. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2015. С. 107–116.

5) Трифонова А.В. Понятийные способности как основа индивидуального интеллектуального ресурса: дисс. … канд. психол. наук: 19.00.13 / Трифонова Алина Владимировна. – М., 2015. – 132 с.

6) Холодная М. А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. 2-е изд. - СПб.: Питер, 2004. - 384 с: ил. - (Серия «Мастера психологии»).

7) Холодная М.А. Понятийные, метакогнитивные и интенциональные способности как ресурсный фактор интеллектуального развития // Ментальные ресурсы личности: теоретические и прикладные исследования: Материалы третьего международного симпозиума (Москва 20-21 октября 2016 года) / отв. ред. М.А. Холодная, Г.В. Ожиганова. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2016. – 383 с.

8) Холодная М.А. Психология интеллекта. Парадоксы исследования. – 3 издание, переработанное и дополненное. - Сер. Авторский учебник.«Издательство ЮРАЙТ» (Москва), 2019. – 334 с.

9) Холодная М.А. Психология понятийного мышления: От концептуальных структур к понятийным способностям / М.А. Холодная. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2012. – 288 с.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-500-507

Лызь Наталья Александровна, Истратова Оксана Николаевна

Южный федеральный университет

ПРОЦЕССУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Аннотация. *Статья посвящена изучению процессуальной стороны информационно-образовательной деятельности (ИОД) обучающихся в интернет-пространстве. На основе анализа психолого-педагогических исследований построена процессуальная модель и определены основные этапы ИОД: постановка /принятие цели, планирование и поиск ресурсов, исполнение, отслеживание результатов, завершение цикла или коррекция деятельности / цели. Представлены варианты модели для частично регулируемой, саморегулируемой и самоуправляемой ИОД. Верификация разработанной модели проведена в ходе эмпирического исследования.*

Ключевые слова: *информационные технологии, информационно-образовательная деятельность, модель, процесс, цель, планирование, исполнение, отслеживание результатов, коррекция.*

Annotation. *The article is devoted to the study of the procedural side of students' information-educational activity in the Internet. Based on the analysis of psychological and pedagogical research, a procedural model was built and the main stages of information-educational activity were defined: setting / adopting a goal, planning and searching for resources, execution, results monitoring, completion of a cycle or correction activities / goals. Variants of the model for partially regulated, self-regulating and self-governing information-educational activity are presented. The verification of the developed model was carried out in the empirical research.*

Keywords: *information technologies, information-educational activity, model, process, goal, planning, execution, results monitoring, correction.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-22019

Цифровизация образования стимулирует широкое использование интернет-ресурсов и интернет-технологий в подготовке инженерных кадров. Многомерное и ресурсоемкое интернет-пространство предоставляет огромные возможности для формального, неформального и информального образования [5]. В условиях существенной информационной избыточности среды образовательная деятельность обучающихся приобретает новый характер. Под информационно-образовательной деятельностью (ИОД) мы понимаем самостоятельную социально, личностно и Интернет обусловленную познавательную, поисковую, коммуникативную, развлекательную и информационно-созидательную активность субъекта, реализующуюся посредством сети Интернет, направленную на решение образовательных задач и/или имеющую результатом расширение его жизненного, образовательного, профессионального опыта [6] (рис.1).

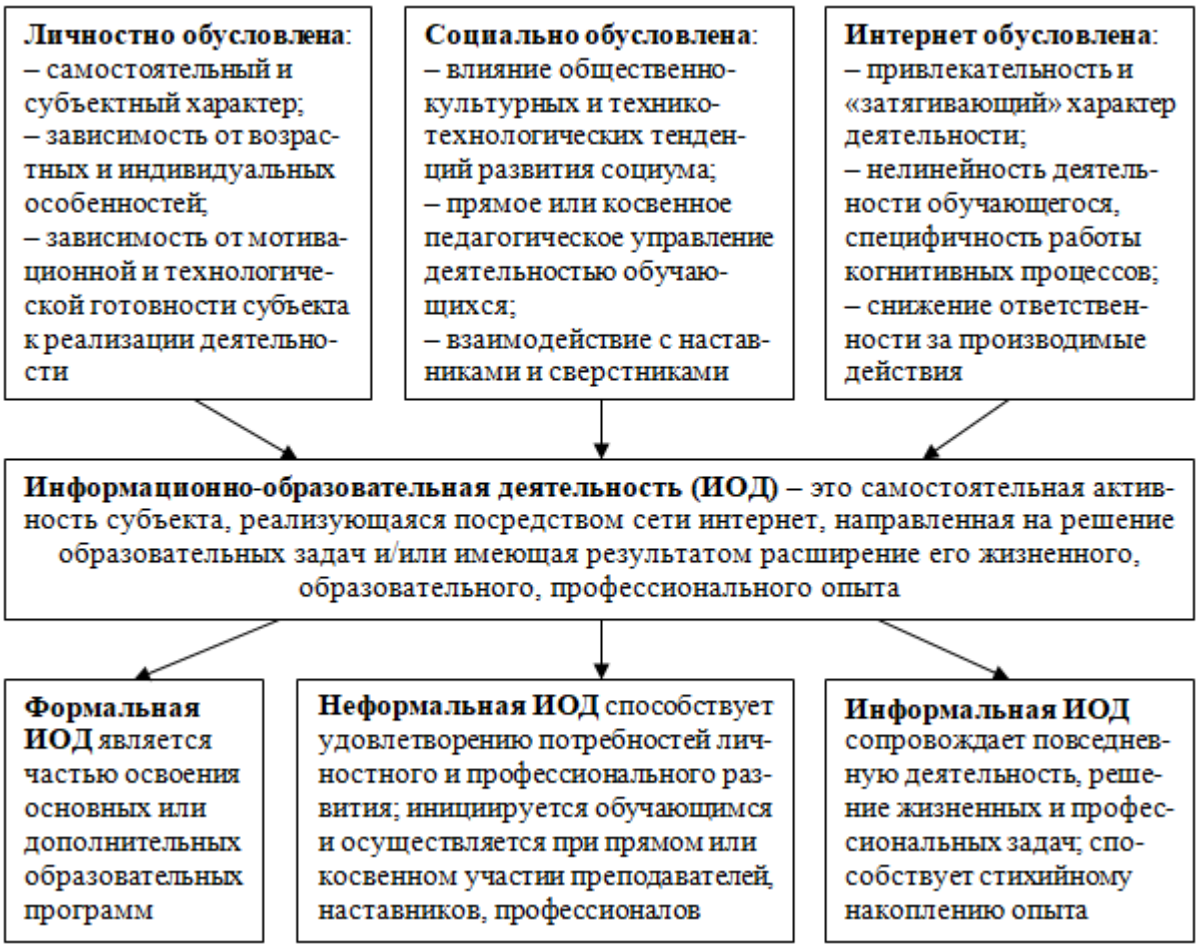


Рис. 1. Обобщенное представление информационно-образовательной деятельности

Для сопровождения информационно-образовательной деятельности обучающихся в интернет-пространстве необходимо создать модели такой деятельности. Деятельность можно рассматривать с позиции макро- и микроанализа, внешнего и внутреннего «планов», содержательно-логической и процессуально-временной структуры. Настоящая статья посвящена разработке и верификации модели информационно-образовательной деятельности обучающихся в ее процессуальном аспекте.

В структуре как учебной, так и информационно-поисковой деятельности выделяются внешние компоненты (действия, результаты) и внутренние психические компоненты, которые побуждают, программируют, регулируют и реализуют деятельность [1, 3, 7, 9]. Классическая процессуальная структура учебной деятельности, разработанная в отечественной психологии, включает мотивационно-ориентировочное, исполнительно-операционное (учебные задачи и учебные действия), контрольно-оценочное звенья [8]. В структуре самостоятельной образовательной деятельности студентов, осуществляемой в опоре на информационно-коммуникационные технологии, выделяют мотивационно-ориентировочный, целеполагающий, содержательно-операционный, организационно-управленческий, исполнительский и контрольно-оценочный (рефлексивный) компоненты [4], а также ряд стадий: установление целей обучения, поиск и получение доступа к ресурсам, принятие плана и выполнение учебных действий, мониторинг и оценка эффективности результатов, переоценка стратегий обучения и определение путей улучшения учебного опыта [10].

На основании теоретического анализа результатов вышеупомянутых исследований концептуально разработана процессуальная структура информационно-образовательной

деятельности, которая включает стадии (этапы), определяющие последовательность взаимосвязанных внешних и внутренних действий обучающихся:

– постановка / принятие цели;
– планирование деятельности и поиск ресурсов;
– исполнение (учебные действия);
– отслеживание (самоконтроль, рефлексия, анализ) результатов;
– завершение цикла или коррекция деятельности (возврат к этапу 2) или коррекция цели (возврат к этапу 1).

При этом постановка / принятие цели, исполнение и отслеживание результатов являются инвариантными процессуальными компонентами ИОД, а остальные – вариативными, зависящими от степени участия самого субъекта в реализации управленческих функций (инициации деятельности, ее направления, регулирования в процессе исполнения, контроля, коррекции). По этому признаку выделены три вида информационно-образовательной деятельности [6]:

– частично регулируемая ИОД – преимущественно исполнительская активность, стимулируемая извне поставленными задачами и внешним контролем;
– саморегулируемая ИОД – целенаправленная активность обучающихся, включающая понимание и постановку образовательной задачи, планирование процесса ее решения, выполнение учебных действий, самоконтроль результатов;
– самоуправляемая ИОД – это внутренне мотивированная, полностью осознанная деятельность, предполагающая понимание собственных образовательных потребностей, интересов, актуальных задач личностного и профессионального развития; постановку образовательных целей и планирование действий; выбор и использование форм, методов, ресурсов; самоконтроль процесса и результатов; оптимизацию и повышение эффективности деятельности.

Частично-регулируемая деятельность включает три минимально необходимых компонента: принятие цели, исполнение, отслеживание результатов. Структуры одного цикла саморегулируемой и самоуправляемой информационно-образовательной деятельности представлены на рис. 2.

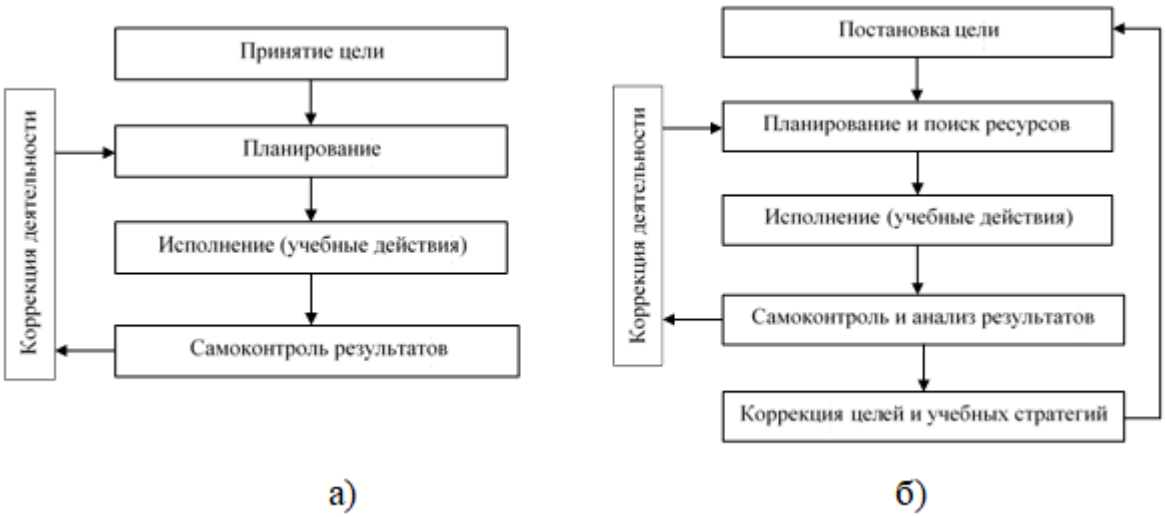


Рис. 2. Структуры одного цикла саморегулируемой (а) и самоуправляемой (б) информационно-образовательной деятельности

С целью верификации построенной процессуальной модели информационно-образовательной деятельности обучающихся было проведено эмпирическое исследование. В нем приняли участие студенты первого курса Института компьютерных технологий и

информационной безопасности Южного федерального университета (164 человека). Методом исследования выступило анкетирование по специально созданной анкете в соответствии с пятью выделенными ИОД: учебно-познавательной ИОД, поисково-познавательная ИОД, коммуникативно-познавательная ИОД, информационно-созидательная ИОД, развлекательно-познавательная ИОД [6]. Респондентам предлагалось описать цели, действия и оценить вклад каждого вида деятельности в их информационно-образовательную деятельность в целом. Процессуальный аспект ИОД определялся через описание последовательности действий в интернет-пространстве, предпринимаемых обучающимися для достижения поставленных целей.

Результаты показали, что половину всей ИОД (49,9%) занимают учебно-познавательная (25,1%) и поисково-познавательная (24,8%) информационно-образовательные деятельности [2]. Иными словами, в основном ИОД реализуется посредством освоения знаний и умений в процессе работы с электронными образовательными ресурсами интернет-пространства и поиска информации о конкретном явлении, факте. Как правило, эти два вида деятельности тесно связаны между собой. Следующим по выраженности видом является развлекательно-познавательная ИОД (19,4%), в которой обучающийся, преследуя цели, напрямую не связанные с учебой, может получить опыт, полезный для решения образовательных и профессиональных задач. Коммуникативно-познавательный вид ИОД выражен на 16,9%. Она в основном связана с организацией совместной деятельности в решении учебных задач. Наименьший опыт студенты-первокурсники имеют в информационно-созидательной ИОД (13,6%).

Для содержательного наполнения процессуальной модели приведем примеры выделенных этапов для каждого вида информационно-образовательной деятельности обучающихся. При этом нами также представлен внутренний план образовательной деятельности, а именно ее мотивационная основа. Это сделано для дальнейшего анализа специфики процесса для каждого вида ИОД.

Таблица 1. Содержание этапов информационно-образовательной деятельности обучающихся

<table>
<tr><th>Этап</th><th>Учебно-познавательная ИОД</th><th>Поисково-познавательная ИОД</th><th>Коммуникативно-познавательная ИОД</th><th>Информационно-созидательная ИОД</th><th>Развлекательно-познавательная ИОД</th></tr>
<tr><td>Постановка / принятие цели</td><td>Получение новых/ глубоких знаний в области учебной и профессиональной деятельности</td><td>Поиск/ отбор актуальной информации; самостоятельное получение/ расширение знаний;</td><td>Обмен информацией в процессе взаимодействия для решения учебных и профессиональных задач; расширение знаний; координация действий в совместной работе</td><td>Создание контента на основе полученного учебно-профессионального опыта; отработка учебных и профессиональных навыков</td><td>Расширение/ получение знаний в процессе получения/ поиска (переработки) интересной информации; узнать новое в ненавязчивой форме; отдохнуть от длительной умственной нагрузки</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Мотив</td><td colspan="3">Учебно-познавательный и профессиональный интерес</td><td colspan="2">Самореализация и самоутверждение</td></tr>
<tr><td colspan="2">Саморазвитие и самообразование</td><td colspan="3">Взаимопомощь и обмен опытом</td></tr>
</table>

	Подготовка к контрольным учебным мероприятиям	Работа с актуальной информацией; повышение квалификации; решение конкретных учебных задач	Оценка информации и расстановка приоритетов; организация совместной деятельности	Получение прибыли от продвижения своего контента, тренировка учебных навыков	Любопытство, «быть в тренде», занять себя в свободное время, отвлечься от рутины, релаксация
Планирование и поиск ресурсов	Используя любое электронное устройство, получить доступ в Интернет				
	Открыть известный «поисковик»		Объединиться в группу для дальнейшего взаимодействия в чате	Создание собственного пространства (страница в соц. сети, блог и т.д.); теоретическая подготовка (знания и умения) и материальная (необходимое оборудование) к созданию контента	Найти время для данного вида деятельности
	Выделить время для занятия по выбранной теме; найти нужный раздел, тему				

Исполнение[12]	Изучение электронных ресурсов (учебников, пособий, документов) (30 %), отработка учебных навыков на тренажерах/ выполнение практических работ (24 %), прохождение онлайн-курсов и вебинаров (13 %), поиск необходимой информации (13 %), просмотр учеб-ного видео (8 %), общение с экспертами в сети (8 %), выполнение контрольных работ (4 %)	Выбор и использование поисковых систем (26 %), отбор релевантной информации (26 %), ввод запроса (по ключевым словам и фразам) (19 %), анализ отзывов на материал для дальнейшего принятия решения о его использовании (6 %)	Обсуждение вопросов в чате/ форуме (38 %), общение с экспертами в интересующей области (16 %), распределение ролей в чате при выполнении совместного проекта (13 %); создание чата, участие в видеоконференциях, групповое принятие решения, анализ информации, совместный сбор данных (по 6 %).	Создание контента (К.) (32 %), загрузка К. (15 %), изучение предметной области и технологий по созданию К. (12 %), поиск путей зарабатывания денег на представлении своего К. (12 %); реклама К. (9 %), создание пространства для размещения К. (9 %), обсуждение К. в сети/ работа с обратной связью (9 %); развитие навыков по созданию К. (2 %)	Просмотр новостных лент (28 %), поиск информации по интересующему вопросу (22 %), общение в сети с экспертами и на форумах (19 %), просмотр онлайн-видео (12 %), создание поисковых запросов (7,5 %), «блуждание» по сети (9 %)
Отслеживание /	Отслеживание нужного ресурса/ задания	Анализ информации из разных источников, сопоставление результатов поиска	Сопоставление совместно полученной информации, осознание собственной позиции; рефлексия полученного опыта	Обновление контента; обработка обратной связи от подписчиков	Поиск объяснения непонятного контента, перевод иностранных слов/текстов
	Анализ полученной информации с уже имеющимися знаниями				
Завершение коррекция	Принятие решения о полезности информации в соответствии с целями работы				
	Сделать вывод и перейти к следующему ресурсу / заданию	При нехватке информации или сомнении в ее достоверности перейти на другие ресурсы	Выработка итогового решения	Ожидание успеха; «двигаться дальше»	

Содержательный анализ этапов информационно-образовательной деятельности разных видов показывает следующее. Цели первых четырех видов ИОД (учебно-познавательной,

[12] Действия представлены в порядке убывания по частоте упоминания участниками исследования.

поисково-познавательной, коммуникативно-познавательной и созидательно-познавательной) напрямую соответствуют содержанию этих видов деятельности и совпадают с ведущей мотивацией.

Для более традиционных видов (учебно-познавательной и поисково-познавательной ИОД) выделены все этапы процессуальной модели. То есть более формализованные виды лучше операционализированы и самими обучающимися. Стоит отметить, что такой этап самоуправляемой ИОД, как «коррекция целей и учебных стратегий» не нашел пока отражения в ответах респондентов, что может быть объяснено небольшим опытом ИОД и слабой структурированностью и рефлексией своих образовательных целей первокурсниками. Изучение данного вопроса на более старших курсах может стать дальнейшей перспективой исследования.

Несмотря на меньшую представленность в опыте образовательной деятельности у респондентов, созидательно-познавательная деятельность довольно четко структурирована в процесс: те, кто имеет опыт такой деятельности, четко видят ее цели, расширенно представляют планирование (от закупки необходимого оборудования до тренировки специальных навыков по созданию контента), исполнение описывают через алгоритм (например, подготовить качественный материал – анонсировать его в сети – разместить на заранее определенный интернет-ресурс – обработка обратной связи от целевой аудитории – обновление контента – ожидание успеха). Этапы отслеживания и коррекции отражают цикличность данного вида деятельности: для достижения успеха необходимо постоянно отслеживать отклики аудитории, обновлять контент и т.д.

Коммуникативно-познавательная ИОД также довольно четко представлена в этапах, что говорит о востребованности данного вида деятельности у современных студентов в связи с распространением интерактивных и групповых форм деятельности, а также о мобильности студентов в организации и координации своих усилий в групповом решении учебно-профессиональных задач.

Для развлекательно-познавательной ИОД отмечается соответствие целей содержанию (результату – расширению опыта), но несовпадение цели с мотивами. Это подтверждает информальный характер данного вида деятельности в образовании субъекта. Этот вид деятельности оказался и наименее структурирован в выделенный в ходе теоретического анализа цикл процессуальной модели ИОД. Так, есть цель (напрямую не связанная с образованием), отсутствует планирование (только один респондент определил необходимость планирования времени для развлекательно-познавательного вида ИОД). Менее развернуто (по сравнению с другими видами ИОД) представлен этап отслеживания, отсутствует этап коррекции. Все это говорит о стихийности образовательной деятельности данного типа. Несмотря на это, респонденты отмечают полезность опыта полученного, например, в компьютерных играх-стратегиях для развития системного мышления, важного в проектной деятельности инженера. Однако результат этот рефлексируется не «здесь и теперь», а имеет более отдаленный эффект.

Таким образом, теоретически построенная процессуальная модель информационно-образовательной деятельности обучающихся верифицирована в эмпирическом исследовании. Содержательный анализ процессуальной модели разных видов ИОД показал, что выделенные в ходе теоретического анализа этапы присутствуют во всех видах ИОД, однако, чем информальнее деятельность, тем менее развернуто содержательное наполнение таких вариативных составляющих, как «планирование», «отслеживание» и «коррекция». Перспективами исследования может стать изучение данных этапов ИОД у обучающихся с бóльшим опытом информационно-образовательной деятельности, а также создание психолого-педагогического инструментария для дальнейшей верификации представленной модели в целях разработки путей сопровождения обучающихся в их информационно-образовательной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюнова Л.Н. Развитие моделей информационного поведения с позиции обобщенной психологической теории деятельности // Вестник Санкт-Петербургского Университета. 2008. Сер. 12. Вып. 3. С. 439–444.

2. Истратова О.Н, Лызь Н.А. Концептуальная модель информационно-образовательной деятельности обучающихся в интернет-пространстве // Азимут научных исследований: педагогика и психология. 2019. № 2 (27) (в печати).

3. Кудрина Е.В. Структура учебной деятельности студентов вузов в условиях дистанционного обучения // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. Серия: Педагогика. Психология. Социальная работа. Ювенология. Социокинетика. 2010. Т. 16. № 4. С. 54–57.

4. Куликова С.С. Самостоятельная образовательная деятельность студентов в информационной среде // Человек и образование. 2007. № 1-2 (10-11). С. 100–103.

5. Лызь Н.А., Истратова О.Н. Роль информационно-образовательного интернет-пространства в непрерывном образовании личности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». 2019. Т. 11. № 1. С. 33–41.

6. Лызь Н.А., Истратова О.Н. Информационно-образовательная деятельность в интернет-пространстве: виды, факторы, риски // Педагогика. 2019. № 4. С. 16–26.

7. Нижегородцева Н. В., Жукова Т. В. Методика комплексной диагностики психологической структуры учебной деятельности студентов и готовности к обучению в вузе // Ярославский педагогический вестник. 2015. № 1. Том II. С. 119–123.

8. Талызина Н.Ф. Педагогическая психология: Учеб. пособие для студентов пед. учеб. заведений. – М: Академия, 1999. – 288 с.

9. Abdullah M.H. Self-directed learning // ERIC Clearinghouse on Reading, English, and Communication. Bloomington, 2001.

10. Kim R., Olfman L., Ryan T., Eryilmaz E. Leveraging a Personalized System to Improve Self-Directed Learning in Online Educational Environments // Computers & Education, 2014. Vol. 70. Issue 1. P. 150–160.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-508-516

Эксакусто Татьяна Валентиновна, Кибальченко Ирина Александровна

Южный федеральный университет

РАЗВИТИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-ЛИЧНОСТНОГО РЕСУРСА БУДУЩИХ IT-СПЕЦИАЛИСТОВ В УСЛОВИЯХ МЕТАПРЕДМЕТНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. *Цель исследования заключается в обосновании эффективных способов развития у будущих IT-специалистов интеллектуально-личностных ресурсов, обусловливающих их успешность. Задача исследования - организация содержания метапредметных технологий, направленных на продуцирование ценностно-смыслового образовательного результата. Полученные на основе метапредметных образовательных технологийрезультаты, значимо свидетельствуют о положительной динамике в компетентности, навыках эффективной коммуникации, рефлексивной самооценке, повышении уровня личностной и интеллектуальной зрелости у студентов.*

Ключевые слова: *интеллектуально-личностный ресурс, развитие ресурса, метапредметные образовательные технологии, студенты IT-специальностей.*

Abstract. *Theaimoftheresearchistofindoutandsubstantiateeffectiveways of developing future IT-specialists intellectual and personal resources providing their professional success. The research problem is to create and initiate the content of metasubject technologies pointed at producing axiological educational result. The results of the research obtained on the basis of the metasubject educational technologies show positive dynamics in students' personal competence, effective communicative skills development, their reflexive self-assessment and becoming personally and intellectually mature.*

Keywords: *intellectual and personal resource, resource development, metasubject educational technologies, IT students.*

Статья публикуется при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-013-00029 А.

Современный профессионал, это человек, обладающий как профессиональными,так и универсальными (надпрофессиональными) компетенциями, что приобретает особую актуальность в инженерной сфере, сфере IT-технологий. Современные IT-компании в условиях жесткой конкуренции стремятся к такому подбору команды, которая будет способствовать успешности предприятия на профессиональном рынке. Такая успешность связана не только с навыками разработки ПО, системной интеграции,программирования и т.п., но и с такими компетенциями сотрудников, как креативность, их умение решать проектные задачи различного уровня сложности, иметь навыки эффективного командного взаимодействия, коммуникативной и социальной компетентности (включая развитый социальный интеллект) [8], быть ответственным и гибким в принятии решенийи т.п. Современные тенденции в контекстетребований к профессионалу отражаются в актуальных образовательных стандартах, которые предполагаютнеобходимость развития универсальных, метапредметных компетенций,способствующих успешности личности как с точки зрения ее профессионализма, так и с точки зрения ее интеллектуально-личностной зрелости.Можно сказать, что в современных образовательных стандартах акцентируется необходимость развития профессиональной компетентности студентов за счет развития их индивидуального ресурса, включающего динамическую подсистему с дифференциально-интегрирующим механизмом взаимодействия интеллектуального и личностного ресурсов, то есть интеллектуально-

личностный ресурс (ИЛР). ИЛР обусловливает успешность и состоятельность студентов (будущих IT-специалистов), способность решать творческие, аналитические задачи высокого уровня когнитивной сложности в самых разнообразных учебных и жизненных ситуациях.

Интеллектуально-личностный ресурс представляет собой актуализированную динамическую подсистему, в которой механизм взаимодействия интеллектуального и личностного ресурсов обусловливает образование метапредметных качеств в индивидуальном ресурсе субъекта как специалиста новой формации – знающего, понимающего, интеллектуально развитого,состоятельного, успешного в самых разнообразных учебных и жизненных ситуациях [2].

Другими словами, современный молодой человек, обладающийтаким особым ресурсом, как интеллектуально-личностный, приобретает ресурсную базу способностей сохранять психологическую устойчивость и сопротивляемость неблагоприятным воздействиям. В результате чего можно прогнозировать развитие возможности разрешать жизненные задачи, планировать и осуществлять пути самосовершенствования. Прогноз успешности обучения будущих IT-специалистов и развития у них ИЛР актуален и перспективен, имеет теоретические основания, так как, у них, чаще всего, хорошо развиты отдельные компоненты (понятийный, метакогнитивный, интенциональный)или элементы ментального ресурса, включающего в качестве подструктуры ИЛР.

Активация интеллектуально-личностного ресурса происходит в тех ситуациях, условиях, пространстве, которые наделены ресурсной ролью, имеют для личности значение. Поэтому учебные условия (в том числе содержание учебных программ, фонды оценочных средств) играют особую роль в расширении поля актуальных и перспективных возможностей студентов, в совершенствовании структуры и уровня их индивидуального ресурса, который запускается и направляется «инструментальной оснащенностью субъекта» [1; 3].

Инструментальная оснащенность студентов (универсальные и общепрофессиональные компетенции) выполняет роль средства при взаимодействии с внешними ресурсами (они задаются учебной ситуацией), что способствует развитию личностной и профессиональной успешности студентов. В этой связи особую актуальность приобретает возможность и целесообразность оказания помощи и содействия студентам в понимании закономерных причин их саморазвития и самоактуализации, что обеспечивается метапредметными образовательными технологиями.

Целью метапредметного образования является не просто освоение учебной деятельности, а генерация и продуцирование такого образовательного результата, который имеет ценность и для обучающегося, и для окружающего его мира [6].Метапредметные технологии представляют собой особыепедагогические способы работы с мышлением, коммуникацией, действием, пониманием и рефлексией обучающихся.Они, во-первых, отличаются динамичностью, активностью (с точки зрения вовлечения в образовательный процесс студентов). Во-вторых, для этих технологий характерен уход от монологичности, директивности в позиции преподаватель-студент (когда информация поступает со стороны педагога, а студенты выступают своего рода «объектами» приема информационных потоков). В-третьих, метапредметные технологии способствуют формированию знаний через развитие собственной рефлексивной позиции, собственный опыт, они снимают чувство страха, боязни перед неправильным ответом (т.к. многие методы построены на выборе ответа не путем зазубривания знаний, а ответов, приходящих во время групповых дискуссий, обсуждений).

Рассмотрим основные метапредметныетехнологии, которые используются в работе состудентами инженерных специальностейв Южном федеральном университете на базе Института компьютерных технологий и информационной безопасности.

1. Рефлексивные технологии, которые относятся к так называемой рефлепрактике (специально организованное взаимодействие между людьми, направленное на актуализацию и формирование у них рефлексивного процесса (механизма) [4]. Рефлексия может быть

групповойи индивидуальной. Групповую рефлексию можно определить как совместное обсуждение и анализ событий, происходящих в группе, с целью стимуляции групповых и индивидуальных процессов.К индивидуальным рефлексивным методам можно отнести множество приемов и техник:

– *рефлексивная самооценка опыта,* позволяющая обучающимся занять позицию «наблюдателя», «исследователя» или «контролера» по отношению к не только к своим действиям и мыслям, но и к другому «персонажу» в учебном процессе(что обеспечивает развитие студентов по формуле: опыт плюс рефлексия опыта есть развитие)[9];

– *развитие понятийных (семантических) структур,* что обеспечивает способность теоретического анализа и понятийного синтеза научных терминов, расширение когнитивного состава понятий, входящих в структуру интеллектуальных ресурсов;

– *прием парадоксальной, «невозможной»* [5] информации, актуализирующей способность размышлять в режиме вариативного анализа происходящего, что обеспечивает открытость познавательной позиции, входящей в структуру интеллектуальных ресурсов;

– *метод решения задач различных типов* (от стандартных, с недостаточностью исходных данных, с неопределенностью в постановке вопроса, без требования, до авторских), способствует формированию различных знаний и умений (общих, специальных, профессиональных), развитию творческого мышления, открытой познавательной позиции и т.п.

– *прием обучения на моделях* и др.

2. Групповая дискуссия является основным, опорным методом в работе со студенческой молодежью. Основным этот метод является потому, что предполагает, прежде всего, спонтанный, жестко не структурированный характер ведения обучения, отсутствие директивности поведения преподавателя. Дискуссия позволяет: прояснить собственную позицию; выявить многообразие подходов, точек зрения по какому-либо вопросу и в результате обмена ими подвести к всестороннему видению предмета. Она развивает умение импровизировать, действовать за рамками предусмотренного, преодолевая страх перед неизвестностью, недоверие к себе, боязнь быть неправильно понятым и т.п. [7].

3. Квест – одна из современных технологий, которая еще только начинает использоваться в образовательном процессе. Квест – это прежде всего игра-приключение, в которой участники решают определенные задачи для достижения конкретной цели. Результатом квеста является:активизация и мотивация студентов на работу в рамках дисциплины;рефлексия своих индивидуальных особенностей, навык управления временем и т.п.

4. Деловые игры – метод моделирования реальной социальной ситуации, который способствует развитию навыков совместной деятельности, сотрудничества в ходе принятия группового решения. Деловые игры относятся к многошаговым процедурам, имитирующим динамику процесса в сжатом масштабе времени и характеризующимся наличием обратной связи.

5. Мозговой штурм (brainstorm) – метод решения проблемы на основе стимулирования творческой активности, при котором участникам обсуждения предлагают высказывать как можно большее количество вариантов решения. Затем из общего числа высказанных идей отбирают наиболее удачные, которые могут быть использованы на практике.Мозговой штурм применяется в тех условиях когда:необходимо узнать мнение каждого члена группы;нужны примеры из «практики», а не просто абстрактные идеи;важно дать понять группе, что участие каждого очень важно в проекте;необходимо найти творческое решение нестандартной задачи.

Помимо указанных технологий в образовательном процессе могут использоваться и такие как: метод моделирования, кейсы, тренинговые технологии, психогимнастика и др.

Таким образом использование метапредметных образовательных технологий приобретает особую актуальность в обучении IT-специалистов (их деятельность достаточно специфична с точки зрения интеллектуальных и социально-личностных навыков, что требует особого внимания со стороны образовательной организации). Соответственно целью настоящего исследования стало изучение особенностей развития интеллектуальных и личностных ресурсов

студентов IT-специальностей в условиях использования метапредметных образовательных технологий. Нужно отметить, что перечисленные технологии используются нами в ходе преподавания гуманитарных дисциплин для всех направлений подготовки будущих IT-специалистов: «Психология управления личностными ресурсами», «Психология профессионального саморазвития» «Основы проектной деятельности». Результаты изменений в интеллектуально-личностном развитии студентов и магистрантов получены в условиях репрезентативной выборки (n=207).

Рассмотрим технологию и результаты использования в учебном процессе некоторых метапредметных образовательных процедур.

1) Использованиеметодов рефлексивной самооценки

Студентам на первом этапе предлагается провести анализ и самооценку некоторых результатов своей проектной деятельности. На втором этапе студенты сравнивают собственный результат анализа с результатом преподавателя и делают выводы. Мы предлагали оценить способность студентов к планированию и прогнозированию при разработке проектов. Первоначально студенты не могли на научном уровне определить проблему и доказать актуальность своего проекта. После диалога и кругового полилога(групповой дискуссии) при обсуждении идей проектов, студенты делали выводы о недостатках конкретных знаний, о противоречиях в причинно-следственных связях, о противоречиях в оценке и самооценке проектов студентом и преподавателем.Обратим внимание на тот факт, что первоначально (в начале семестра) у студентов чаще наблюдалась предрефлексивная проблемная (55%), но неконфликтная самооценка. Она была определена в процессе анализа самоотчетов студентов, по их отношению к полученным результатам в индивидуальном и групповом обсуждении. На втором этапе (в конце семестра) предрефлексивная самооценка стала наблюдаться значимо реже в сравнении с рефлексивной самооценкой ($\varphi^*_{эмп} = 2{,}461$ при $p \leq 0{,}01$). Полученный факт свидетельствует о том, что у студентов стал чаще использоваться способ самопознания и адекватного оценивания своей деятельности.

2) Использование методов развития понятийных структур

Технологии, направленные на изучение и развитие понятийных (семантических) структур, используются с целью формирования у студентов способности к теоретическому анализу и понятийному синтезу изучаемых научных терминов, расширения у них когнитивного состава понятий предметного поля. На первом этапе (в начале семестра) студентам предлагались диагностические задания-субтесты, включающие в качестве стимульного материала надпредметные категории («время», «информация», «канал» и др.). Соответственно, образуя классы, группы, категории, студенты должны выделить особенные черты, отличающие одну категорию от других. На этом этапе студенты учились определять и объяснять существенные и периферические (несущественные) признаки, группировать их и т.д.На втором этапе студентам было предложено выделить ключевую категорию изучаемого предметного поля и применить ее в качестве стимула для дальнейшей работы по категоризации, выделению модальностей, группировке понятий. Студентами была выделена одна категория «информация», над которой работали все. На третьем этапе был проведен контрольный срез на основе тех же субтестов, но стимульный материал был вновь изменен в рамках изучаемого предметного поля. На этом этапе студенты самостоятельно предлагали уже ряд категорий: «криптография», «алгоритм», «проект», «нечеткая логика», «логическое суждение», «ресурс», «базы данных».

Анализ полученных результатов двух срезов показал достоверные сдвиги по следующим показателям работы с понятийными структурами:

- количество предложенных предметных понятий (8 и 33);
- количество групп понятий (3 и 7);
- количество признаков когнитивного состава концепта (9 и 34);
- количество выделенных модальностей (4 и 8);
- количество модальностей, улучшающих содержание понятия (1 и 5);

– количество модальностей, ухудшающих содержание понятия (4 и 1).

Сравнение результатов осуществлялось по Т-критерию Вилкоксона для определения достоверных положительных и отрицательных сдвигов, по которым определялся эффект от предложенных заданий (**$T_{Эмп} = 1$, при** $p \leq 0{,}05$). Полученный результат свидетельствует о достоверности положительного сдвига в диагностических показателях, что отражает повышение когнитивной сложности состава концептов. Содержательный анализ показал, что первоначально студенты предлагали категории «улучшающие содержание понятия», «ухудшающие содержание понятия», «соответствующие определению», характеризующиеся отсутствием дифференциации категорий. При этом на завершающем этапе студенты демонстрировали более высокий уровень понятийного мышления в учебной деятельности:

– из набора предложенных студентами понятий словвыделяли группы операций, алгоритмов, процедур, методов, функций, процессов, обозначающие разные аспекты категории;

– в процессе работы с целью обобщения слов из предметного поля понятий демонстрировали категориальные способности;

– связывая по смыслу слова из поля понятий, демонстрировали способности конструировать семантический контекст и достаточно высокую степень сложности установленных связей (например, категории «шифр, блок, структура» связывались в смысловую фразу: «Шифр имеет блок замены и структуру сети Фейстеля»; «информация, канал, алгоритм» - в смысловую фразу: «Передача информации по открытым каналам осуществляется с помощью алгоритма RSA»).

У студентов были обнаружены изменения в когнитивном стиле аналитичность/синтетичность: они стали познавать не только специфическое стимулы при изучении понятий, но и стремились отдельные стимулы воспринимать как целое на основе общего для них. Они чаще стали демонстрировать особый тип познавательного отношения к миру, открытую познавательную позицию: готовность принимать парадоксальную информацию, необычные сведения и принимать творческие решения. (табл. 1)

Таблица. 1. Результаты изменений когнитивного стиля и познавательной позиции у студентов до и после работы с понятийными структурами

	Когнитивный стиль аналитичность / синтетичность	Открытая познавательная позиция (%)	Неопределенная познавательная позиция (%)	Закрытая познавательная позиция (%)
До начала эксперимента	61% / 39%	19%	45%	36%
После эксперимента	42% / 58%	52%	29%	19%
Различия по критерию «Угловое преобразование Фишера»	φ*эмп = 2,82 при p≤0,01 (достоверное различие)	φ*эмп = 4,94 при p≤0,01 (достоверное различие)	φ*эмп = 2,332 при p≤0,01(достоверное различие)	φ*эмп = 2,677 при p≤0,01(достоверное различие)

3)Квест и его использование в образовательном процессе

Применение образовательных квестов предполагает наличие определенного времени и пространства (без ограничения в перемещении) и набор различных по своей сложности нестандартных заданий. В образовательном процессе на практических занятиях (как правило на первом занятии)нами используется линейный квест.Задачи в нем решаются по цепочке одна за другой. Цель нашегоквеста – создание пространства для командного взаимодействия, снижение психологической дистанции между студентами группы, развитие доверия, сплоченности (через

срабатываемость). Студенты делятся на подгруппы (по 5 человек) и выбирают человека, которому они доверяют (как правило это референтный для большинства членов подгруппы человек). Каждой команде необходимо выполнить набор заданий (он одинаков для всех) в строго ограниченное время: взять автограф у преподавателя вуза (с расшифровкой подписи), спеть хором песню о своей команде, найти монету/купюру иностранной валюты, найти три необычных предмета (и доказать их необычность), найти использованный билет на проезд в любом виде транспорта и т.п. При этом действуют строгие правила: при выполнении задания члены команды не имеют права отходить друг от друга дальше, чем на один метр (за этим следят наблюдатели – это те лидеры, которые были выбраны каждой подгруппой на первом этапе, а затем они переходят в другую команду и наблюдают за ней); опоздание на каждую минуту от назначенного преподавателем времени штрафуется вычетом баллов. Результатом этого квеста является:

– активизация и мотивация студентов на работу в рамках дисциплины;

– осознание студентами сложностей и преимуществ командного/группового взаимодействия (зачастую, каждый по-разному видит стратегию выполнения заданий и студентам бывает сложно договориться друг с другом: с чего начинать решение поставленных задач; однако, когда у кого-то из членов команды находится проездной или монета иностранной валюты – они понимают, что сообща проще справиться с заданием);

– рефлексия своих индивидуальных особенностей: проявление лидерских навыков или позиции ведомого, навыков убеждения, управления временем и т.п. (у будущих инженеров зачастую проявляется достаточно пассивная позиция и недостаток коммуникативных навыков, в процессе квеста они начинают осознавать это: «я понял, что можно выполнить это задание по-другому/лучше, но меня никто не услышал…Нужно уметь убеждать людей, а у меня не получилось».

4) Использование деловой игры в образовательном процессе

Примером деловой игры (которая используется на наших занятиях) является создание проекта программного продукта, который будет пользоваться спросом у определенного круга пользователей. Цель игры – создать проект привлекательного программного продукта, описав его предназначение и содержание. При этом нужно подготовить лифтовую речь (Elevator Pitch), описывающую достоинства продукта для потенциальных инвесторов или его потребителей. Группа делится на две-три команды. Время выполнения проекта – полтора часа. Преподаватель обозначает студентам, что для выполнения всех этапов задания важно распределить функционально-ролевые обязанности в группе: координатор проекта, разработчики, тест-команда, PR-команда. Интересно, что некоторые команды идут по пути жесткого распределения ролей, «назначая» исполнителей по каждой ролевой позиции, другие – начинают сразу обсуждать проект и в конце игры обнаруживают, что заданные роли были автоматически приняты отдельными членами группы (эти команды как правило, более успешно справляются с заданием и происходит осознание важности правильно принятой и эффективно выполненной роли с точки зрения профессиональной и личностной успешности). На конечном этапе команды представляют презентацию своего программного продукта с использованием лифтовой речи. Подготовка последней (с учетом достаточно жестких условий и правил лифтовой речи) вызывает серьезные трудности у начинающих программистов: как за ограниченное время показать все достоинства программного продукта, его преимущества перед конкурентными разработками и вызвать желание инвестора вложить в проект деньги (или вызвать желание у потенциального покупателя – приобрести его). Результатом деловой игры становится как правило: развитие более интенсивных коммуникативных связей в группе, формирование навыков взаимодействия в условиях столкновения интересов членов группы, развитие креативности студентов, готовности к решению профессиональных задач в короткие сроки.

5) *Использование мозгового штурма и анти-брейнторминга (обратный мозговой штурм) в образовательном процессе*

В нашей практике для мозгового штурма используются разные задачи: от шуточных до профессиональных и организационных. (Напрмер: «Вы руководитель известной IT-компании, ваша компания должна закончить проект к заданному сроку, но вы понимаете, что это практически невозможно. Анализ ситуации на вашем предприятии показал, что сотрудники часто отвлекаются на перекуры/онлайн-игры/социальные сети и т.п. (выбирается что-то одно). Ваша задача устранить данную проблему (испоьзуя минимум материальных вложений) и добиться выполнения проекта в срок. Ваши действия?»). Как правило в заданной ситуации студенты сначала идут традиционным путем: материальное стимулирование/наказание, установка камер для наблюдения, система штрафов. Однако затем, выдвигаются достаточно оригинальные способы решения задачи: организация тренинга по таймменеджменту для сотрудников, отчет по окончании дня в виде пазлов, которые собираются в общую картину (кто не сдает пазл – нарушает общую структуру «картины») и т.п.

Одной из разновидностей мозгового штурма является *анти-брейншторминг*. Участникам предлагается быть как можно более негативными по отношению к принимаемому решению (например, задается вопрос «что нужно сделать, чтобы все испортить/провалить?»). После этого сгенерированные негативные идеи служат «толчком» для принятия правильного решения (от обратного). Такая разновидность мозгового штурма может применяться в тех ситуациях, когда группа зашла в тупик в поиске правильного решения, слабо замотивирована на принятие решений. Эта технология используется нами в тех случаях, когда в студенческой группе наблюдается спад интереса к занятию, низкая включенность в учебный процесс. Примером обратного мозгового штурма может стать предложение студентам продумать способ продвижения программного/системного продукта потенциальным потребителям. Для этого задается вопрос: «Что нужо сделать, чтобы наверняка «провалить» это мероприятие?». Как правило этот вопрос вызывает смех, заинтересованность студентов, они заметно активизируются и дают такие предложения как «завалить человека/организацию спамом, для того чтобы они заблокировали ваш контакт», «выставить очень завышенную цену продукта», «написать письмо с орфографическими ошибками» и т.п.

В результате проведения мозгового штурма и анти-бренйншторминга у студентов появляется понимание эффективности принятия группового решения, понимание своей роли в процессе генарции идей (фасилитатор, критик, интегратор, организатор, креатор и т.п.).

По результатам мониторинга изменений личностных и социально-психологических особенностей студентов, происходящих в условиях применения описанных метапредметных образовательных технологий можно заключить следующее. В начале семестра фиксируется достаточно негативный (его демонстрирует около 27% студентов) или индифферентный (25%) взгляд студентов как по отношению к дисциплине, так и к самому себе, что с одной стороны может свидетельствовать о пассивности этих людей, с другой – об их закрытой познавательной позиции. По окончании курса, на уровне обнаруженных тенденций (студенты пишут эссе по результатам самодиагностики и рефлексии своих профессионально-личностных особенностей и/или особенностей своих межличностных отношений) можно заключить, что студенты становятся склонны к адекватному самоанализу, проявлению личностной зрелости, осознанности (например, в одной из работ, студент на основе анализа своих личностных и профессиональных особенностей пишет: «На занятиях… я понял чего мне не хватало в жизни, что двигало мной и ради чего я учусь в магистратуре…Цель…И сейчас она у меня появилась. Для ее достижения мне нужны ресурсы: внешние и главное – внутренние…»). В ходе размышлений студентов – становится очевидной их работа над собой, их самоанализ (например, довольно часто можно встретить такую фразу «…для того чтобы развиваться, мне необходимы время и усилия…Самое сложное – сделать первый шаг…», или «…мне трудно заводить контакты с другими, я испытываю страх и робость в отношениях с другими, но теперь я понимаю, что все можно изменить…» и т.п.).

Таким образом, содержательный анализ по результатам применения метапредметных образовательных технологий позволяет заключить следующее:

– студенты демонстрируют более глубокий уровень личностной и интеллектуальной зрелости, что проявляется в наличии положительной динамики по показателям рефлексии, вовлеченности, самооценки, уверенности в себе, мотивации учебной и профессиональной деятельности, эмоционального интеллекта;

– студенты отмечают развитие у себя навыков эффективной коммуникации (в том числе, навыков невербальной коммуникации):углубление социально-значимых связей, умение организовывать свое взаимодействие с другими более успешно и эффективно;

– молодые люди демонстрируют рост компетентности по вопросам самопознания, самосознания: способность оценивать и планировать результативность своей деятельности, осознанность выбора жизненных целей; определение перспектив своего развития, возможностей максимально раскрыть и проявить себя;

– студенты обнаруживают более высокий уровень понятийного мышления в предметном поле понятий, доминирование открытой познавательной позиции и синтетического когнитивного стиля.

В заключении также важно отметить, что по окончании дисциплин и по результатам применения метапредметных образовательных технологий студенты IT-специальностей, демонстрируют высокую удовлетворенность обучением (9,5 из 10 баллов), отмечая, что работа на занятиях привела не только к пониманию ими вопросов, связанных со своим личностным и профессиональным развитием, но и к более тесным, сплоченным отношениям в студенческой группе, к большему взаимопониманию и умению работать в команде. Можно сказать, что студенты начинают более точно осознавать свои возможности, свой уровень притязаний, свои доминирующие жизненные цели, что безусловно определяет успешность личности как профессиональную, так и личностную. Можно заключить, что развитие интеллектуальных и личностных ресурсов их единство и целостность,являются предиктором их интеграции в ресурс нового качества и содержания, что может обусловливать успешность субъекта личностного и профессионального развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрова, Л.А., Лебедева, А.А., Бобожей, В.В. Психологические ресурсы личности и социально-психологическая адаптация студентов с ОВЗ в условиях профессионального образования // Психологическая наука и образование. Изд-во: Московский государственный психолого-педагогический университет. М. 2014. №1. С.50-62.

2. Кибальченко,И.А., Эксакусто, Т.В., Истратова, О.Н. Интеллектуально-личностный ресурс субъекта развития: теоретические основы. – Таганрог, Изд-во ЮФУ, 2017. – 160 с.

3. Леонтьев, Д.А.Саморегуляция, ресурсы и личностный потенциал // СПЖ. 2016. № 62. С. 18-37. DOI: 10.17223/17267080/62/3

4. Рефлексивный тренинг как средство разрешения конфликтных ситуаций - Культурно-историческая психология - 2009. № 3. Портал психологических изданий PsyJournals.ru —http://psyjournals.ru/kip/2009/n3/24586_full.shtml

5. Холодная, М.А., Хазова, С.А. Феномен концептуализации как основа продуктивности интеллектуальной деятельности и совладающегоповедения / Психологический журнал. Т. 38. № 5. 2017. С. 5-17. DOI: 10.7868/S0205959217050014

6. Хуторской, А.В.Метапредметное содержание образования с позиции человекосообразности. [Электронный ресурс] // Вестник института образования человека. Изд-во:Некоммерческое научно-образовательное частное учреждение "Институт образования человека"(Москва).02.03.2012 г. – http://eidos-institute.ru/journal/2012/0302.htm

7. Эксакусто, Т.В. Групповая психокоррекция: тренинги, и ролевые игры, упражнения для личностного и профессионального развития. – Ростов н/Д: «Феникс», 2015, – 254 с.].

8. Dawson, J., Thomson, R. The future cybersecurity workforce: Going beyond technical skills for successful cyber performance (2018) Frontiers in Psychology, 9 (JUN), статья№ 744. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00744 Типдокумента: Review

9. Hamdan, M.Z. The countenance of info-communication technologies: Re-inventing the quality of schooling methodology (2017) ICSIT 2017 - 8th International Conference on Society and Information Technologies, Proceedings, 2017-March, pp. 108-113.(Conference Paper)

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-517-524

Плёнкин Антон Павлович, Федотова Анна Юрьевна, Познина Наталия Анатольевна, Самойленко Валерия Сергеевна

Южный федеральный университет

ПРАКТИКА ВНЕДРЕНИЯ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. *В статье рассмотрены тенденции изменяющегося образовательного процесса. Проведен анализ процесса обучения в университетах на примере нескольких методик. Рассмотрены вопросы интеграции новых методов образования в классическое обучение студентов. Показана схема проведения образовательного процесса с применением эффективных методик проектного обучения студентов в высшей школе и университете. Приведены примеры проектных решений для отдельных курсов. Дан анализ эффективности предлагаемой методики проектного обучения с точки зрения приобретения студентами новых компетенций и реального опыта работы в команде.*

Ключевые слова: *проектное обучение, образование, методика, проектная практика, проектный офис, инженерное образование*

Abstract. *The article discusses the trends of the changing educational process. The analysis of the learning process in universities on the example of several techniques. The questions of the integration of new methods of education in the classical training of students are considered. The scheme of the educational process with the use of effective methods of project teaching students in high school and university is shown. Examples of design solutions for individual courses are given. An analysis is made of the effectiveness of the proposed methodology for project training from the point of view of acquiring new competencies and real work experience in a team by students.*

Keywords: *project training, education, methods, project practice, project office, engineering education*

За последние несколько лет особое место в образовательном сообществе заняла тематика модернизации образовательного процесса, предполагающая внедрение форматов освоения проектных навыков [1]. Задача освоения студентами новых компетенций и навыков, позволяющих им реализовывать комплексные проекты и инициативы, широко принимается и поддерживается преподавателями и работодателями. Однако образовательная система испытывает дефицит управленческих механизмов и инструментов, способных интегрировать современные форматы проектной подготовки в учебный процесс и нехватку специалистов, способных обеспечивать развитие проектных технологий (наставники, менторы, тьюторы и т.д.).

Механизмы вовлечения студентов и преподавателей в проектную деятельность, представляют особенную ценность. В настоящее время уже сформирован значительный практический перечень векторов для реализации проектного обучения в организациях высшего образования. Модернизация образовательной модели за счет интеграции проектной работы в процесс обучения неизбежно приходит в классическое образование [2].

В Южном федеральном университете опыт внедрения проектного обучения в рамках классической образовательной модели показывает эффективный результат. В ВУЗе сформирован четкий план по реализации и внедрению проектной деятельности в образовательный процесс. Для этого были выявлены основные цели и задачи, которые ставит перед собой университет [3].

В общем виде проектное обучение предусматривает наличие проектов в процессе обучения студентов, как особого вида учебной деятельности, обязательной части подготовки. Проектное обучение определяется как вид отдельной, специально организованной деятельности

студентов, ограниченной во времени, нацеленной на решение определенной проблемы и имеющей в качестве результата конечный продукт деятельности.

Динамичный опыт внедрения проектного обучения позволяет сформировать различия между классической моделью образования и современной моделью проектной практики [4]. В качестве главной цели проектного обучения обозначено сближение университета с потребностями отраслей экономики и реальной профессиональной практикой. Проектное обучение нацелено на разработку студентами востребованного практического решения через реализацию полного жизненного цикла проекта. Немаловажную роль в цикле проектного обучения играет междисциплинарный подход [5].

Изменения в организации учебного процесса путем внедрения проектного обучения на отдельных специальностях или направлениях необходимо осуществлять поэтапно. Эффективная модель проектного обучения должна представлять из себя совместную деятельность преподавателей, внешних экспертов, менторов, заказчиков и студентов. Такая модель должна быть направлена на создание уникального продукта и формирование научно-технического задела, совместно с достижением дополнительных образовательных результатов [6].

Рассмотрим две модели обучения, распределенные во времени и имеющие разные подходы. Классическая модель обучения характерна для традиционных высших учебных заведений. В такой модели практически полностью отсутствует взаимодействие студентов с внешними менторами. Как правило, только студенты старших курсов, аспиранты или докторанты имеют возможность взаимодействовать с внешними агентами. Цель такого взаимодействия - выполнение реальных проектов (или их частей) под руководством наставников из университета и менторов. В классической модели образования такое взаимодействие называется практикой студентов [7].

В отличие от классического подхода, проектный подход при обучении студентов подразумевает внедрение проектных практик непосредственно с первого курса обучения. Нами разработана и применяется на практике проектная модель обучения студентов в университете. При этом модель проектного обучения включает в себя синтезированные методики получения компетенций студентами.

Практика проектного обучения, где проектная деятельность понимается как организация самоуправляемой деятельности малой группы студентов, обучающихся в процессе создания конкретного проекта с обязательной презентацией итогов работы. Идея внедрения проектного обучения в университете возникает когда теоретические знания, получаемые студентами первых лет обучения слабо подкрепляются практическими навыками [8].

Изучив современное состояние образования, мы пришли к выводу, что одним из наиболее эффективных методов для сокращения разрыва между теорией и практикой является инициатива CDIO (Conceive, Design, Implement, Operate – Замысел, Разработка, Внедрение, Использование) [9]. Декларируемая цель CDIO: инженер — выпускник вуза должен уметь придумать новый продукт или новую техническую идею, осуществлять все конструкторские работы по ее воплощению (или давать нужные указания тем, кто будет этим заниматься), внедрить в производство то, что получилось. Отметим, что классический подход к обучению не подразумевает таких стадий.

Практика CDIO находит свое отражение в международном движении WorldSkills, в котором в последние годы начали принимать активное участие студенты высших школ со всего мира. Таким образом, проектное обучение вводится в образовательный процесс с целью формирования к окончанию обучения студентами портфолио проектов для дальнейшего успешного трудоустройства.

Внедрение проектного подхода с первого года обучения было сделано для того, чтобы студенты с первого курса могли почувствовать неразрывную связь теоретических знаний и практических навыков. Применение проектного обучения является хорошей возможностью дать

студентам необходимые практические навыки создания проектных решений, навыки работы в команде, а также организации, распределения и планирования работ по проекту.

Проектный подход в обучении рассматривается как организация самоуправляемой деятельности малой группы студентов через совокупность поисковых, проблемных, творческих и других методов, развивающих компетенции обучающихся в процессе создания конкретного проекта с обязательной презентацией этих результатов.

Проанализировав двухгодичный цикл внедрения проектного обучения, было установлено, что применение проектного обучения позволило усилить мотивацию изучения студентами дисциплин основной образовательной программы по профилю специальности.

Для того чтобы максимально вовлечь студентов и преподавателей в проектную деятельность, было принято решение внедрить стандарты проектной деятельности в образовательную программу. Южный федеральный университет имеет собственные образовательные стандарты по всем направлениям подготовки [10]. В стандартах всех профилей обучения института прописаны требования к организации учебного процесса. Так, в собственном образовательном стандарте введен пункт, согласно которому «все научно-педагогические работники, привлекаемые к реализации ООП, должны проходить повышение квалификации или стажировку не реже одного раза в три года, направленные на повышение компетенций в области преподавания, активных методов обучения, методов оценки результатов обучения. Научно-педагогические работники, участвующие в реализации профессиональных дисциплин и руководстве проектной деятельностью, должны проходить повышение квалификации или стажировку на профильных предприятиях, направленных на формирование у них личностных и межличностных навыков, навыков создания продуктов и систем».

Для организации работы по ведению проектной деятельности необходимо перестроить учебный график так, чтобы освободить на первых курсах последние пары. Данные пары целиком отводятся под выполнение проектов. Так как на преподавателей, курирующих работу проектных групп, ложится большая дополнительная нагрузка, в институте предусмотрены доплаты за руководство каждой проектной командой. Во всех стандартах базовым модулем образовательных дисциплин указан «Модуль проектной деятельности», который направлен на решение профессионально-ориентированных проектных задач. Данный модуль содержит дисциплину «Введение в инженерную деятельность», которая реализуется на первых двух курсах (с 1 по 4 семестры) для всех студентов. В рамках данного курса студенты выполняют два творческих командных проекта. Также в данный модуль входит дисциплина «Творческий проект», реализуемая на 3-4 курсах, и представляющая собой междисциплинарный проект, выполняемый индивидуально [11].

Для организации проектной деятельности в университете создается специализированная информационная среда (программное обеспечение). Данная среда - это система управления проектами. На сайте института преподаватели размещают темы проектов и краткое описание задания по проекту. Сроки размещения и все остальные стадии жестко регламентируются. Все проекты должны быть направлены на создание продукта творческим коллективом студентов. В виде конечного продукта проекта могут быть представлены программные продукты, технические изделия, информационные системы и т.п. Описание типа и характеристик конечного продукта задается преподавателем, формирующим тему проекта. При этом для каждого проекта преподаватели указывают количество человек для коллектива исполнителей. Минимально коллектив может состоять из четырех человек, максимально из восьми.

В университете формируется пул преподавателей и тем проектов. Студенты в отведенные сроки имеют возможность выбрать тему проекта или предложить свою тему. В последнем случае студентам необходимо самим сформировать команду. Все проекты выполняются под руководством наставника. В расписании занятий для выполнения проектов отводятся практические занятия, на которых руководители проектов и студенческие коллективы исполнителей непосредственно занимаются выполнением проектов. Основными задачами

проектной команды на первом этапе является выбор лидера команды, распределение ролей в команде и составление плана выполнения работ. Период выполнения проекта длится шесть месяцев (один семестр). Защита проектов осуществляется командой в полном составе в виде публичного представления перед комиссией. На защите проектов в комиссии присутствуют представители реального бизнес сектора, профильных организаций и преподаватели университета. Защита оценивается по нескольким компетенциям. По результатам выполнения проекта команда готовит пояснительную записку и презентацию результатов. Обязательным условием является демонстрация реально работающего продукта, полученного в результате выполнения проекта. В процессе выполнения проектов студенты должны продемонстрировать способность эффективно работать в составе творческого коллектива с целью выполнения технического задания и разработки конечного продукта, удовлетворяющего установленным требованиям и характеристикам.

В период выполнения проектов, команда фиксирует результаты в системе управления проектами. Таким образом, каждый может следить за ходом выполнения проектов и оставлять комментарии.

Цели проектной деятельности университета:

– формирование способности понимать сущность информационных процессов в обществе и инженерной деятельности;

– формирование творческого мышления и умения работать в команде;

– формирование способности понимать сущность проектно-технологической деятельности в информационных технологиях;

– формирование навыков самостоятельного проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Задачи проектной деятельности университета:

– сформировать представление об инженерной деятельности в целом;

– развить интерес студентов к инженерной профессии, стимулировать и мотивировать заниматься инженерной деятельностью;

– познакомить студентов с инженерной практикой посредством участия в выполнении групповых творческих проектов;

– заложить основу для развития профессиональных и личностных навыков студента, описанных в перечне планируемых результатов обучения CDIO;

– помочь студенту в выборе индивидуальной образовательной траектории в рамках направления/специальности подготовки;

– удовлетворение потребностей личности в интеллектуальном развитии.

Отметим, что выполнение проектов осуществляется параллельно с основной программой обучения. Студентам создаются условия, максимально приближенные к реальным. Таким образом, студенты уже с первого курса получают опыт работы в небольшой команде, где у каждого своя роль. Более того, предусмотрен механизм исключения членов команды из коллектива. Как и в любом коллективе присутствуют студенты, которые не выполняют вовремя задания и не посещают проектные занятия. В таком случае команда принимает решение об исключении такого студента из проектного коллектива. Обратим внимание, что руководитель (преподаватель) не участвует в этом процессе.

Как и любой проект, образовательный процесс имеет свои итерации. Для успешного прохождения обучения, студентам 1 и 2 курса необходимо выполнять несколько следующих видов работ:

1. реферат, выбор темы первого проекта и формирование команды проекта (1 семестр)
2. первый творческий проект (2, 3 семестр)
3. второй творческий проект (3, 4 семестр).

Первый семестр является вводным. Студенты посещают лекции по курсу «Введение в инженерную деятельность». На лекциях они знакомятся с основами проектной деятельности и овладевают компетенциями по организации работы в команде, по выполнению проектов. Студенты получают знания о том, какие в проекте могут быть роли, какие обязанности ложатся на каждого члена команды и т.д. Весь процесс контролируется и отслеживается преподавателем через электронную систему управления проектами. Через систему электронного обучения студенты загружают свои рефераты, могут просматривать работы сокурсников, выставлять им оценки и писать замечания. Также при такой схеме кураторы творческих проектов размещают технические задания к проектам и создают темы для обсуждения проектов, где студенты могут задать все интересующие их вопросы и записаться на интересующий их проект. Студенты имеют время, чтобы изучить все технические задания, задать преподавателям вопросы, выбрать тему, сформировать команды и записаться на проект.

Целью написания реферата является расширение кругозора студента, освоение опыта работы с научно-популярной и технической литературой, приобретение навыков осуществлять поиск и обработку научно-технической информации, развитие аналитико-синтетических, исследовательских и других умений, способностей формулировать проблемы и анализировать возможные пути их решения.

Далее в рамках дисциплины студентам предлагается выполнить первый и второй творческий проект [12]. Во время занятий проектные команды встречаются со своими кураторами, отчитываются о проделанной работе, консультируются по возникающим вопросам. Куратор проекта ведет учет активности работы как команды в целом, так и каждого студента по отдельности. В каждой команде происходит распределение ролей участников проекта. Например, в составе команды проекта могут иметься позиции: менеджера проекта, программиста, тестировщика, схемотехника, разработчика 3D моделей и др. Члены команды проекта могут совмещать отдельные позиции, а также на одной позиции могут участвовать несколько студентов при условии разграничения области ответственности.

Промежуточные результаты выполнения проектов представляются каждой командой наставникам в отведенное для этого время. Презентация промежуточных результатов проекта должна содержать:

- техническое задание на проект
- план реализации проекта
- пути реализации проекта
- команда проекта: участники команды, степень участия каждого члена коллектива
- заключение.

Отметим, что команда придумывает себе название самостоятельно, сходя из предпочтений и пожеланий каждого участника команды. По результатам выполнения проекта должна быть подготовлена пояснительная записка и презентация результатов выполнения проекта. Обязательным условием является демонстрация реально работающего продукта, полученного в результате выполнения проекта. Значительным плюсом в презентации команды будет являться наличие мнения стороннего эксперта или представителя бизнеса. В процессе выполнения проектов студенты демонстрируют способность эффективно работать в составе творческого коллектива с целью выполнения технического задания и разработки конечного продукта, удовлетворяющего установленным требованиям и характеристикам.

Для организации и управления проектной деятельностью в университете, а также расширения возможностей студентов и преподавателей в международном сотрудничестве и реализации международных проектов, создается специальный орган – Проектный офис.

На данном этапе формирования Проектного офиса в его структуре находится 3 должности:

- Директор Проектного офиса
- Заместитель директора Проектного офиса

– Координатор Проектного офиса.

– Основной целью Проектного офиса является создание доступной среды для сотрудничества студентов и реализации проектов.

– Для реализации цели необходимо выполнить ряд следующих задач:

– Сформировать понимание у студентов и преподавателей о Проектном офисе и его основных возможностях.

– Создать бренд «Проектный офис»

– Разработать информационную систему для поддержки творческих проектов, расширения возможностей представления студенческих проектов на конкурсах, а также беспрепятственного общения «студент – наставник».

Для взаимодействия и работы со студентами в рамках Проектного офиса необходимо привлекать не только преподавательский и профессорский состав, но и студентов/магистров/аспирантов. Это иной уровень взаимодействия. В такой совместной проектной работе студент может раскрыться более полно, отбросив стеснение и замкнутость. Отсутствие страха перед реализацией проекта – залог успешно проделанной работы и положительного результата. Для вовлечения студентов в проектную деятельность и формирования корректного представления о проектах, необходим заинтересованный и ответственный человек.

Формирование бренда и создание информационной системы Проектного Офиса – важная задача для успешной работы.

Необходимо разработать:

– Документацию
– Регламенты
– Логотип
– Контент план для работы в социальных сетях

Это позволит устойчиво развиваться и самостоятельно выбирать траектории движения.

Для создания информационной системы, необходимо отталкиваться от основных задач проектной деятельности и взаимодействия «студент – наставник» [13]. Основными функциями системы является информационная и коммуникативная. Студент может выбирать любого наставника, в соответствии с возникшим у него вопросом. У каждого наставника в личном кабинете отражается область его интересов и темы возможных проектов. Студент и наставник могут вести диалог по предмету проекта, задавать вопросы и решать различные ситуации. После того, как конкретный вопрос или проблема будут решены, студент выставляет оценку, так называемый «рейтинг» наставнику. Таким образом, у каждого наставника формируется свой собственный рейтинг.

Это позволит устойчиво развиваться и самостоятельно выбирать траектории движения.

Для создания информационной системы, необходимо отталкиваться от основных задач проектной деятельности и взаимодействия «студент – наставник» [13]. Основными функциями системы является информационная и коммуникативная. Студент может выбирать любого наставника, в соответствии с возникшим у него вопросом. У каждого наставника в личном кабинете отражается область его интересов и темы возможных проектов. Студент и наставник могут вести диалог по предмету проекта, задавать вопросы и решать различные ситуации. После того, как конкретный вопрос или проблема будут решены, студент выставляет оценку, так называемый «рейтинг» наставнику. Таким образом, у каждого наставника формируется свой собственный рейтинг.

Также, в рамках информационной среды, необходимо подготовить площадки для освещения конкурсов и мероприятий и новостную ленту. Конкурсы и мероприятия обеспечат стимул к реализации своей идеи, а наставникам может помочь с выбором конкурса. Основная

задача «Новостной ленты» - отражение успехов проектов студентов, а также полезная и актуальная информация о современных технологиях и событиях.

Сайт Проектного офиса постоянно сопровождается модератором – координатор Проектного офиса. Поиск конкурсов и мероприятий, взаимодействие в рамках системы с наставниками, ведение страниц, обновление информации и контент план – основные задачи координатора.

Результатом работы в рамках информационной системы являются решенные вопросы с наставником, уточнение траектории движения по проекту.

Система не содержит рекламной и отвлекающей информации, что позволяет полностью погрузиться в процесс решения и развития проекта.

Результатом деятельности международного сотрудничества Проектного офиса служит расширение форм взаимодействия студентов с иностранными университетами и компаниями.

В университете реализуется современная эффективная модель внедрения и управления процессом проектного обучения студентов университета. Методика основана на глубокой интеграции в классический процесс обучения проектных практик. Отличительной особенностью проектного подхода является интеграция с первого курса обучения синтезированного метода овладения компетенциями. Метод включает в себя организацию проектной атмосферы университета путем создания вертикальной структуры управления. Студенты с первого курса получают практические навыки работы в команде, где каждый играет свою роль и несет персональную ответственность за выполнение задания. Проектная команда работает над реальным проектом, техническое задание на который формируют бизнес-компании. Последнее позволяет студентам с первых курсов почувствовать себя частью коллектива, который работает на одной целью. Кроме того, проектная система управления позволяет преуспевающим студентам двигаться дальше после выполнения проекта. Под руководством менторов и преподавателей университета, команды (или индивидуальные проекты) участвуют в различных программах-акселераторах, бизнес-инкубаторах с целью развития своего проекта.

Анализ показывает, что интеграция проектного обучения в институте способствовала увеличению процента трудоустройства студентов старших курсов в бизнес-компании, повышению успеваемости студентов по смежным инженерным предметам. Отметим, что наиболее эффективным результатом проектной деятельности института является появление стартапов (или стартап-компаний). Такие малые инновационные предприятия, созданные студентами, аффилированы с университетом и являются лучшим показателем прогресса в области развития проектной деятельности [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никифорова Е.В.* Практико-ориентированное проектное обучение - современная модель высшего образования. // Экономика. Бизнес. Банки. 2018. № 2 (23). с. 168-178.

2. Проектное обучение. Практики внедрения в университетах/Под редакцией Л.А. Евстратовой, Н.В. Исаевой, О.В. Лешукова. Москва, 2018. – 152 с.

3. Веселов Г.Е. Опыт внедрения проектного обучения // Аккредитация в образовании" 2018. №7 (107) – с.28

4. Tsybulsky, D., Muchnik-Rozanov, Y. The development of student-teachers' professional identity while team-teaching science classes using a project-based learning approach: A multi-level analysis/Teaching and Teacher Education 79, с. 48-59, 2019

5. Харитонова О.В., Багаутдинова А.Ш., Тарлыков В.А., Шехонин А.А. Образовательные технологии инженерного образования: междисциплинарный подход //Инженерное образование. 2017 №21. –с.117-121

6. Разуваева Т.А. Компетентностный подход к образованию: краткий теоретический анализ // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. –2010. –Т. 16, №1. –С. 266–269.

7. Ellzey, J.L., O'Connor, J.T., Westerman, J. Projects with Underserved Communities: Case Study of an International Project-Based Service-Learning Program/Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice 145(2),05018018, 2019

8. *Габова М.П., Софьина В.Н.* Роль проектной деятельности в развитии профессиональной компетентности студентов в вузе //Современное образование: содержание, технологии, качество. 2015. № 2. С. 107-109

9. Всемирная инициатива CDIO. Стандарты: информационно-методическое издание/Пер. с анг. и ред. А.И. Чучалина, Т.С. Петровской, Е.С. Кулюкиной; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 17 с

10. https://www.sfedu.ru/www/stat_pages22.show?p=EDU/N10056/P – страница сайта с образовательными стандартами ЮФУ

11. http://ictis.sfedu.ru – страница сайта Инженерно-технологической академии, Института компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет

12. Сидоров, О.В. Метод творческих проектов как средство развития научно-технологического мышления студентов, получающих технологическое образование [Текст] / О.В. Сидоров, Л.В. Козуб // Высшее образование сегодня. – 2016. – №5. – С. 59–64.

13. *Круподерова Е.П., Круподерова К.Р.* Реализация компетентностной модели выпускника вуза через сетевую проектную деятельность студентов в условиях информационной образовательной среды //Инновационные проекты и программы в образовании. 2015. № 6. С. 22-26.

14. Project-based learning as an effective method in education //Proceedings of the 2019 International Conference on Modern Educational Technology, Nanjing, China, 2019, Pages 54-57

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-525-536

Горбатюк Владимир Феофанович

Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал)
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)»

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ АВТОРСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ

Продолжаются совершенствование и исследование разработанной ранее авторской технологии обучения Горбатюка В.Ф. Применение упомянутой выше технологии обучения в вузе хорошо иллюстрируется моделью, предложенной автором и описано в ряде работ автора [2, 7, 10, 12, 13, 14].

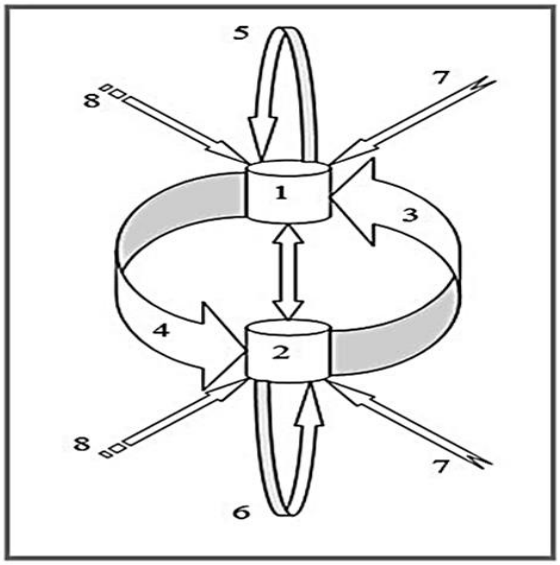


Рис.1. Авторская модель обучения В.Ф. Горбатюка

На рис. 1 приведена авторская модель обучения и приняты обозначения:

1 – электронный образовательный ресурс по предмету; 2 – система заданий по предмету; 3 – цикл (шаг) обучения; 4 – цикл (шаг) применения знаний; 5 – самостоятельное обучение; 6 – самостоятельное применение знаний; 7 – помощь (консультация) преподавателя; 8 – помощь товарищей (взаимное обучение).

В 2018 году автором было найдено подтверждение выдвинутой им ранее гипотезы о фрактальности учебной группы людей. Известные данные позволяют автору прийти к выводу, что учебная группа, состоящая из людей, обладает свойством фрактальности и тем самым ответить на вопрос о фрактальности учебной группы людей [1, 3, 21]. ***А значит, учебная группа людей обладает всеми свойствами самоорганизующейся системы***.

Авторская модель и технология обучения, первоначально разработанные на основе синергетики и взаимного обучения, были в 2018 г. усовершенствованы с использованием идей теории множественных интеллектов Г. Гарднера, а также с применением элементов автодидактики В.А. Куринского [2, 4, 7, 16, 17].

Рассмотрим это немного подробнее. С первого занятия преподаватель объясняет суть самоорганизации и самообучения и создаёт на занятиях в группе ситуацию ***конструктивного хаоса***. Студентам даются задания, электронный ресурс и разрешение общаться с преподавателем не в часы занятий. А траекторию своего обучения (*из множества возможных!*) каждый студент выбирает сам: студенты изучают данный предмет так, как им удобно. Благодаря ситуации конструктивного хаоса в учебной группе совершенно спонтанно образуется ***островок***

самообразования и вся группа, как самоорганизующаяся система, проявляет новые, ***эмерджентные*** качества. Всегда находится один или несколько студентов (***лидеров***), которые самостоятельно начинают осваивать теоретический курс и выполнять индивидуальные задания. Большинство студентов тоже не хотят отстать от лидеров. Не у всех это получается, поэтому им приходится не только самостоятельно работать, но и обращаться за помощью, не только к преподавателю, но и к своим товарищам по учёбе. А последнее не что иное, как ***взаимное обучение***. Оно гораздо эффективнее не только потому, что исчезает барьер ***преподаватель-студент***, но и потому, что при взаимном обучении включаются какие-то скрытые резервы человеческого мозга, который нами изучен ещё недостаточно. Как результат – выполняются достаточно трудные индивидуальные задания за меньшее время, а в конечном итоге вся группа более интенсивно учится и успевает.

Вспомним сформулированную нами ранее новую задачу преподавателя [13] – *найти законы развития системы (учебной группы): аттракторы, запускающие механизм переключения, смены различных режимов развития системы, переходов от одной относительно устойчивой структуры к другой, перехода от первоначальных незнания и неумения к конечным знанию, умению и пониманию, обеспечивающие в целом саморазвитие системы.*

На наш взгляд, ситуация конструктивного хаоса в учебной группе может быть такой [15]:

1. Преподаватель должен быть интересным, хорошо знать свой предмет и проводить занятия так, чтобы студентам захотелось ***без принуждения*** *(аналогия с автодидактикой В. Куринского)* изучать данный предмет.

2. На первом занятии преподаватель объясняет суть авторской модели самообучения. Студентам даются задания, авторский электронный ресурс, разрешение общаться с преподавателем не только в часы занятий (преподаватель сообщает свой мобильный телефон и *e-mail*) и задаются *«правила игры»:*

– студенты *свободны* в выборе индивидуальной (*неединственной для каждого в группе*) траектории обучения, свободно общаются (кроме общения на занятиях) как с преподавателем, так и друг с другом во взаимно удобное время;

– для выполнения каждого задания студентам даётся определённое время, например: *количество недель в семестре, делённое на количество заданий по предмету*. Это стимулирует ритмичную работу студентов и избавляет преподавателя от лавины заданий в конце семестра. *Если задания имеют разную сложность, то это время может назначаться преподавателем по-другому.* В связи с внедрением в нашем вузе балльно-рейтинговой системы (БРС) [19] и появлении в семестре для студентов двух контрольных точек аттестации КТ1 и КТ2 время выполнения заданий увязывается со сроками КТ1 и КТ2;

– ведётся *электронный журнал* учёта результатов выполнения заданий, который всегда доступен для студентов;

– поощряется качество, интересность, оригинальность и своевременность выполнения заданий. Выполненные задания должны демонстрировать понимание изучаемого предмета, *знания* и приобретённые практические навыки, *умения*;

– *вводятся бонусы* для самых активных студентов за лучшие задания, выполненные в срок: зачёт-автомат, повышенная оценка или даже экзамен-автомат. Также вводятся *штрафы* для нерадивых студентов: снижение оценки, недопуск, низкие или даже нулевые баллы в БРС и т.п.

Для создания и поддержания в учебной группе обстановки ***конструктивного хаоса*** преподаватель на каждом занятии периодически «***переключает***» своих студентов [14]:

– рассказывает им *интересную* историю,

– задаёт вопросы (*о которых студенты с улыбкой говорят, что преподаватель любит задавать убийственно простые, но интересные вопросы, на которые они не могут ответить, хотя мозги включены и работают очень интенсивно*),

– показывает *интересный видеоролик, который заставляет задуматься* и т.п.

Каждый преподаватель решает для себя, как он создаёт в своей группе обстановку *конструктивного хаоса*. И тут не лишним будет вспомнить синергетику [20, 22], принципы автодидактики [16, 17], а также идеи теории множественных интеллектов [4].

Если в учебной группе преподавателем удачно создана ситуация конструктивного хаоса, то «правила игры» становятся аттракторами, запускаются механизмы самоорганизации-самообучения и проявляются эмерджентные свойства: учебная группа может быть разделена на две полярные подгруппы:

а) ***студенты, которые сами выполняют все задания*** (именно они образуют *«островок самообразования»*). Это активные ***лидеры*** самообучения. Посредством взаимного обучения они подтягивают остальных студентов своей группы до своего уровня;

б***) студенты, которые не могут сами выполнять задания в срок*** по разным причинам. Они не лидеры обучения и нуждаются в помощи и взаимном обучении.

Это означает, что учебная группа приобретает новые, ***эмерджентные*** свойства: самоорганизацию и самообучаемость.

Но! В подгруппе б) иногда *(к сожалению почти в каждой учебной группе)* выявляется *небольшая* часть студентов ***кое-какеров*** *(термин М. Задорнова),* которые по разным причинам *(а часто без причины)* не посещают занятия и не учатся. Это либо спортсмены, либо участники самодеятельности, либо активисты ещё чего-либо, либо у которых есть *«покровители»,* либо просто разгильдяи… Причём эти ***кое-какеры*** не учатся практически по всем предметам. В конце семестра эти ***кое-какеры*** всеми правдами-неправдами *кое-как* получают зачёт или троечку. И тут никакие современные методики не срабатывают и не помогают [14].

Для справки: каждый электронный ресурс содержит необходимые электронные книги (учебники) и программы, обеспечивающие как изучение предмета, так и выполнение заданий преподавателя, а также образцы выполнения этих заданий. Электронный ресурс выдаётся на первых занятиях всем студентам. Преподаватель взял на себя достаточно утомительный труд: постоянно обновлять все свои электронные ресурсы по всем предметам. Хотя всё, что помещено в электронный ресурс, найдено преподавателем в сети интернет как бесплатное, но из-за несовершенства законодательства и зыбкости границы между платным и бесплатным контентом автор электронного ресурса не рискует выкладывать свои достаточно объёмные электронные ресурсы даже в локальную сеть института, чтобы не разделить печальную судьбу без вины виноватого и через какое-то время оправданного директора одной российской школы. *Если всё закрыть и запретить, то невозможно будет не только учить и учиться, но и работать!* Видимо это и сдерживает наших чрезмерно прытких законодателей…

Практические или лабораторные занятия по данному предмету проводятся в компьютерных классах (по возможности – с электронной интерактивной доской и проектором), а лекции – в аудиториях с проектором, экраном и шторами на окнах. ***Многие студенты приносят на практические и лабораторные занятия свои ноутбуки***.

Преподавателем разработана система заданий для предмета, выполнение которых студентами позволяет судить об усвоении предмета. Речь идёт не об абстрактных теоретических знаниях, а об умениях практически использовать эти знания. Все выполненные задания студенты предоставляют в электронном виде (приносят на флэшках либо присылают преподавателю по электронной почте). Это справедливо для практических, лабораторных и самостоятельных занятий, когда студентам нужно выполнять задания преподавателя.

На лекциях преподаватель не должен устраивать диктанты. Ведь у студентов имеется электронный ресурс по данному предмету. Преподаватель объявляет тему лекции заранее и предлагает студентам ознакомиться по теме будущей лекции с соответствующими разделами электронного ресурса. Автор проводит на лекциях рассмотрение проблем, непонятных и трудных разделов предмета и мастер-классы. Все лекции создаются в электронном виде и оформляются как интерактивные презентации с мультимедиа по теме лекции. В конце каждой

лекции староста (представитель учебной группы) переписывает проведённую лекцию на флэшку и распространяет в своей группе

Развитие мозга и мышления идет только через учёбу, критическое самоосознание и творческое применение знаний на практике.

Ниже в рамочках приводится постоянно улучшаемая автором система заданий по предмету «Современные информационные технологии» для группы первого курса ПСП-511 факультета психологии и социальной педагогики [14]:

Задание №1. Типы данных и носители информации в электронных мультимедиа изданиях

1. Ознакомиться с типами данных и носителями информации в электронных мультимедиа изданиях. Создать свой мини электронный ресурс с различными типами данных. Имя созданного студентом мини электронного ресурса: **Задание 1 ФИО.**

2. Ознакомиться с имеющимися в электронном ресурсе программами записи информации на различные носители.

3. По согласованию с преподавателем записать свой созданный мини электронный ресурс на носитель (*CD-RW*, флэшка).

Задание №2. Работа с текстовыми данными

1. Создать небольшой (1-2 страницы А4) исходный текстовый документ с помощью редактора *WORD*.

2. Имя исходного файла: **Задание 1 ФИО.doc** или **.docx**.

3. Дополнить исходный документ математическими формулами (созданными в редакторе формул) и рисунками (по 2 шт.), гиперссылками (2 шт., не на источники в интернете!!!), таблицами, графиком и гистограммой из *Excel* (2 шт.).

4. График построить средствами *Excel* по данным 1-й таблицы, гистограмму – по данным 2-й таблицы.

5. Имя дополненного файла: **Задание 2 ФИО.doc** или **.docx**..

6. Преобразовать *WORD*-документ программой *PDFCreator* в документ формата *PDF*.

7. Имя преобразованного файла: **Задание 3 ФИО.pdf**.

Задание №3. Презентация

1. Создать небольшую интерактивную мультимедийную презентацию (не менее 5 слайдов) с использованием иллюстраций или фото.

2. Дополнить презентацию аудио и видео данными.

3. На первом слайде ФИО и по возможности фото автора.

4. Смена слайдов по щелчку.

5. Имя файла с презентацией: **Задание ФИО.ppt** или **.pptx**..

6. Созданная презентация должна работать на любом компьютере, в том числе на компьютере преподавателя.

Задание №4. Преподаватель в среде электронного обучения

1. Работа в системе автоматизированного обучения ***MOODLE*** (практические занятия в локальной сети ТИ имени АП Чехова в компьютерном классе, самостоятельные занятия в сети интернет дома – разработка теста на 10 заданий разных типов).

2. Для регистрации в системе ***MOODLE*** у студента должен быть электронный адрес *e-mail*.

3. Вход в систему ***MOODLE***: http:/study.tgpi.ru/

4. Логин и пароль для доступа в систему ***MOODLE*** посылается преподавателем по электронной почте в ответ на письмо-запрос, посланное студентом преподавателю по электронной почте. ***Самому не регистрироваться.***

5. При первом входе в систему необходимо вставить своё фото.

6. Каждый студент составляет для системы автоматизированного обучения ***MOODLE*** тест проверки знаний по теме курса минимум на десять разных типов вопросов.

Бонусные задания.

Студенту необходимо выполнить все или по выбору одно любое из предложенных ниже заданий. Обычно студенты выполняют задания 5 и 6.

Задание №5. Работа с графическими редакторами

1. Ознакомиться с имеющимся в электронном ресурсе графическим редактором *Photoshop*.

2. Взять любой рисунок или фотографию и обработать в редакторе *Photoshop*, добавив: эффекты, фон, шрифтовые эффекты, надписи.

3. Имя графических файлов:

3.1. Исходный файл - **Задание 1 ФИО.jpg**

3.2. Исходный файл с эффектами, фоном - **Задание 2 ФИО.jpg**

3.3. Исходный файл с эффектами, фоном и шрифтовыми эффектами, надписями - **Задание 3 ФИО.jpg**

Задание №6. Работа с видео

1. Ознакомиться с имеющимися в электронном ресурсе программами просмотра и обработки видео.

2. Создать и смонтировать небольшой видеоклип.

3. Наложить мелодию.

4. Добавить титры: название видеоклипа, ФИО автора видеоклипа, используемое программное обеспечение, название мелодии.

5. Имя файла: **Задание ФИО.avi** или **.mp4**.

Задание №7. Интерактивность

1. Ознакомиться с имеющимися в электронном ресурсе интерактивными программами.

2. Поработать с одной из выбранных и согласованных с преподавателем интерактивной программой из электронного ресурса по предмету.

3. Снять с экрана компьютера и записать в формате **.avi** процесс выполнения задания преподавателя.

4. Создать и смонтировать небольшой видеоклип.

5. Наложить мелодию.

6. Добавить титры: название видеоклипа, ФИО автора видеоклипа, используемое программное обеспечение, пояснения своих действий, название мелодии.

7. Имя файла: **Задание ФИО.avi** или **.mp4**.

Особенно ярко преимущества авторской технологии обучения проявились в группе ПСП-511 2017/2018 уч. года. На первых занятиях преподаватель выдал студентам бесплатный цифровой образовательный ресурс (*по данному предмету – примерно 15,3 Гб, постоянно обновляется*) и систему заданий.

Группа (бóльшая часть группы, 14 девочек) по направлению своего деканата сдавала досрочно экзамен по предмету ***Современные информационные технологии***. Эта часть учебной группы (14 девочек) училась и добросовестно выполняла задания преподавателя, поэтому практически все и получили оценку ***отлично*** (рис. 2). 5 студентов не посещали занятия и не были аттестованы.

№	Ф.И.О.	Номер зачетной книжки	Точка 1		28.03.2018		Вес точки, %			50%	Точка 2		04.06.2018		Вес точки, %			50%	Над-бав-ка, %	Итоговый процент				Оценка по рейтингу	29.06.2018 Экзамен	Итог	Фактическая дата выставления оценки
			Процент выполнения				Итоговый процент				Процент выполнения				Итоговый процент					50%	67%	84%	100%				
			Лек.	Пр.	Лаб.	Др.	50%	67%	84%	100%	Лек.	Пр.	Лаб.	Др.	50%	67%	84%	100%									
			10%	22%	0%	68%	неуд	уд.	хор.	отл.	8%	22%	2%	68%	неуд	уд.	хор.	отл.		неуд	уд	хор	отл				
1	Б. Любовь О.	акад. задолж.	10				1													0,5				Неуд		Неуд	
2	Б. Дарья А.	ПСП-1702	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
3	Г. Ангелина С.	ПСП-1703	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
4	Г. Инна А.	ПСП-1704	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
5	Г. Кристина Р.	ПСП-1705	100	100		100				100	100	100	100	70			80						89,8	Отл	Хор	Хор	25.95.2018
6	Г. Анастасия Е.	ПСП-1706	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
7	Д. Анастасия В.	ПСП-1707	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
8	З. Екатерина А.	ПСП-1708	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
9	К. Алексей А.	ПСП-1709	10				1				12				1					0,98				Неуд		Неуд	
10	К. Елизавета И.	ПСП-1710	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
11	К. Елена В.	ПСП-1711	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
12	К. Алексей В.	ПСП-1712	10				1				12				1					0,98				Неуд		Неуд	
13	М. Альбина А.	ПСП-1713	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
14	Н. Алена А.	ПСП-1714	10				1				12				1					0,98				Неуд		Неуд	
15	С. Юлия А.	ПСП-1715	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
16	С. Юлия А.	ПСП-1716	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
17	Х. Инна Д.	ПСП-1717	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
18	Ч. Диана А.	ПСП-1718	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	25.95.2018
19	Ч. Сергей А.	ПСП-1719	10				1							33	22					11,7				Неуд		Неуд	
			Количество студентов				5	0	0	14	Количество студентов				5	0	1	13		5	0	0	14	19			

Рис. 2. Фрагмент электронной ведомости группы ПСП-511

После экзамена часть девочек осталась, им захотелось на прощанье поговорить с преподавателем. Преподаватель в беседе с ними поинтересовался, что им понравилось и что не понравилось во время учёбы и почему. Все студентки дружно сказали, что понравилось всё. А одна студентка сказала даже то, что остальные не решились сказать. Она призналась, что ***под действием какой-то необъяснимой силы им неудержимо хотелось учиться***. Когда преподаватель спросил, может быть это был гипноз? Все девочки дружно ответили, что это был не гипноз. А просто под действием какой-то непонятной, необъяснимой силы им хотелось учить данный предмет. И такого с ними ещё не было ни с одним преподавателем. Подобная ситуация у автора тоже встречается впервые. Необходимы исследования этого явления…

Автор, как преподаватель в этой группе может лишь предположить, что в этой группе ПСП-511 была удачно создана обстановка конструктивного хаоса, которая, возможно, и стала той необъяснимой силой, под действием которой студенткам захотелось учиться.

Раньше студенты групп, в которых автор как преподаватель ранее вёл занятия, при встрече радовались, говорили, что соскучились и спрашивали, когда автор-преподаватель будет у них ещё проводить занятия. *Вот бы так было для всех предметов, но! – мечты, мечты…*

Приведём результаты некоторых исследований, чтобы понять особенности открытого автором системного эффекта.

Современные информационные технологии Группа ПСП-511 2017/2018 учебный год

№	ФИО	Задание 1	Задание 2	Задание 3	Задание 4	Задание 5	Задание 6	Задание 7	Бонусы, штрафы	Экзамен
	психология и социальная педагогика									
1	Б. Дарья Александровна	28.02.2018	28.02.2018? 03.03.2018	07.03.2018, 10.03.2018	23.04.2018	11.04.2018	12.05.2018			Отлично 25.05.2018
2	Г. Ангелина Сергеевна	14.02.2018	28.02.2018, 26.03.2018	28.02.2018	18.04.2018? 18.04.2018	28.03.2018	26.03.2018? 28.03.2018			Отлично 25.05.2018
3	Г. Инна Алексеевна	14.02.2018	28.02.2018? 21.03.2018	28.02.2018	19.04.2018	21.03.2018? 22.03.2018	28.03.2018			Отлично 25.05.2018
4	Г. Кристина Романовна	14.02.2018	21.02.2018	28.02.2018, 21.03.2018	09.05.2018	21.05.2018				Хорошо 25.05.2018
5	Г. Анастасия Евгеньевна	28.02.2018? 12.03.2018	28.02.2018? 12.03.2018	28.02.2018? 12.03.2018	12.03.2018? 13.03.2018	12.03.2018	12.03.2018? 28.03.2018			Отлично 25.05.2018
6	Д. Анастасия Владимировна	14.02.2018	21.02.2018	28.02.2018	07.03.2018	14.03.2018	18.04.2018			Отлично 25.05.2018
7	З. Екатерина Александровна	28.02.2018? 12.03.2018	28.02.2018? 12.03.2018	28.02.2018? 12.03.2018	25.04.2018	12.03.2018	12.03.2018? 28.03.2018			Отлично 25.05.2018
8	К. Алексей Алексеевич									
9	К. Елизавета Игоревна	14.02.2018	21.02.2018	28.02.2018	20.04.2018	14.03.2018	28.03.2018? 30.03.2018			Отлично 25.05.2018
10	К. Елена Владимировна	21.02.2018	21.02.2018	28.02.2018	27.03.2018	21.03.2018	18.04.2018			Отлично 25.05.2018
11	К. Алексей Витальевич									
12	М. Альбина Александровна	14.02.2018	21.02.2018	28.02.2018	07.03.2018	14.03.2018	18.04.2018			Отлично 25.05.2018
13	Н. Алена Александровна									
14	С. Юлия Анваровна	14.02.2018	28.02.2018, 26.03.2018	28.02.2018	21.04.2018	28.03.2018	26.03.2018? 28.03.2018			Отлично 25.05.2018
15	С. Юлия Андреевна	14.02.2018	14.03.2018	07.03.2018	16.05.2018	28.03.2018	16.05.2018			Отлично 25.05.2018
16	Х. Инна Дмитриевна	14.02.2018	21.02.2018	28.02.2018	17.03.2018	11.04.2018	18.04.2018			Отлично 25.05.2018
17	Ч. Диана Александровна	14.02.2018	21.02.2018	07.03.2018	26.03.2018	28.03.2018	16.05.2018			Отлично 25.05.2018
18	Ч. Сергей Андреевич	18.04.2018		18.04.2018						

Рис. 3. Страница электронного журнала группы ПСП-511

По данным электронного журнала (рис. 3) построены диаграммы выполнения заданий во времени [9]. В нашем случае в электронном журнале и в электронной ведомости фамилия каждого студента сокращена до начальной буквы. Это ограничение накладывается *Законом об охране личных данных*. В ячейки таблицы электронного журнала преподаватель заносит дату выполнения каждого задания. Иногда студенты с первого раза не сдают задание. В этом случае в ячейках таблицы могут быть две и более даты. В электронный журнал удобно заносить и результаты аттестации: зачёт и экзамен.

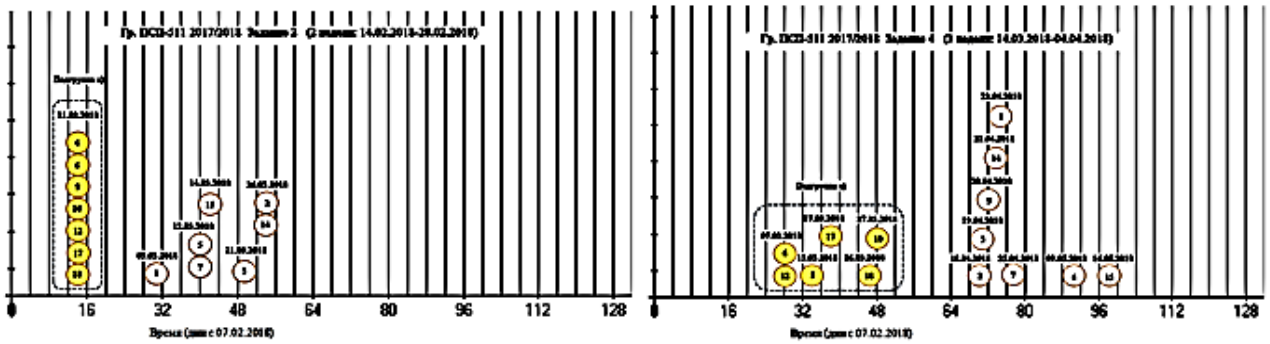


Рис. 4. Диаграммы выполнения заданий 2 и 4 во времени

Для примера на рис. 4 приведены диаграммы выполнения заданий 2 и 4 во времени. Анализ диаграмм выполнения заданий во времени позволил определить количество лидеров в группе. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Количество лидеров в группе ПСП-511 2017/2018

	Задание 1	Задание 2	Задание 3	Задание 4	Задание 5	Задание 6
Количество лидеров	10	7	13	6	13	13
В долях к общему числу	0,714286	0,5	0,928571	0,428571	0,928571	1,0

В таблице 1 кроме количества лидеров для каждого задания приведено также количество лидеров в долях к общему числу обучаемых и далее определены среднее количество лидеров, равное ***10,333333*** и среднее в долях, равное ***0,738095***. Данные диаграмм выполнения заданий каждой студенткой во времени были сведены в таблицу, по данным которой построены графики, приведённые на рис. 5 (на вертикальной оси графика – время в днях от начала занятий). По данным таблицы 1 и рис. 5 можно сделать вывод, что для студентов самыми трудными оказались задания 2 и 4.

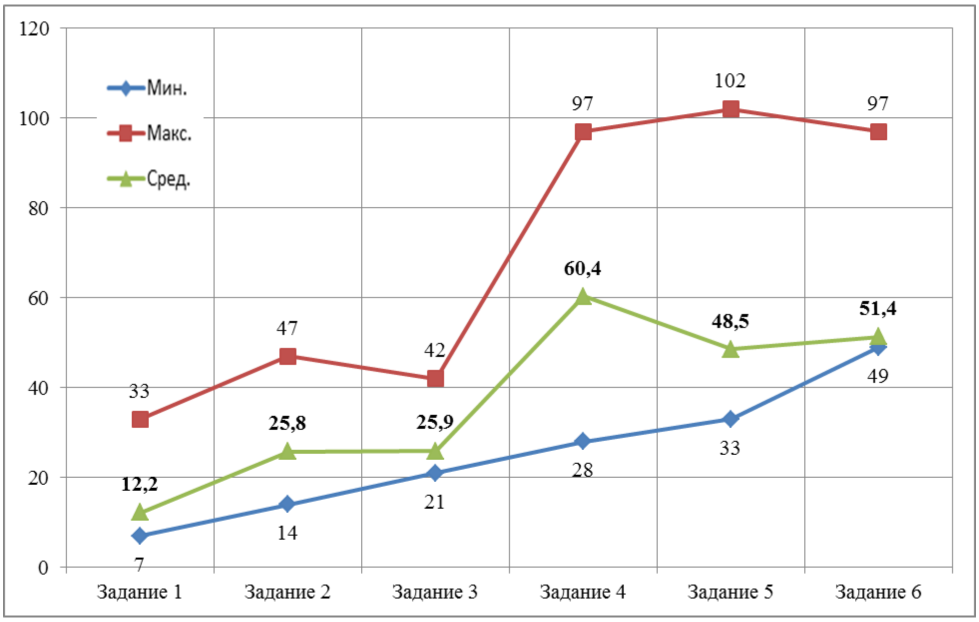
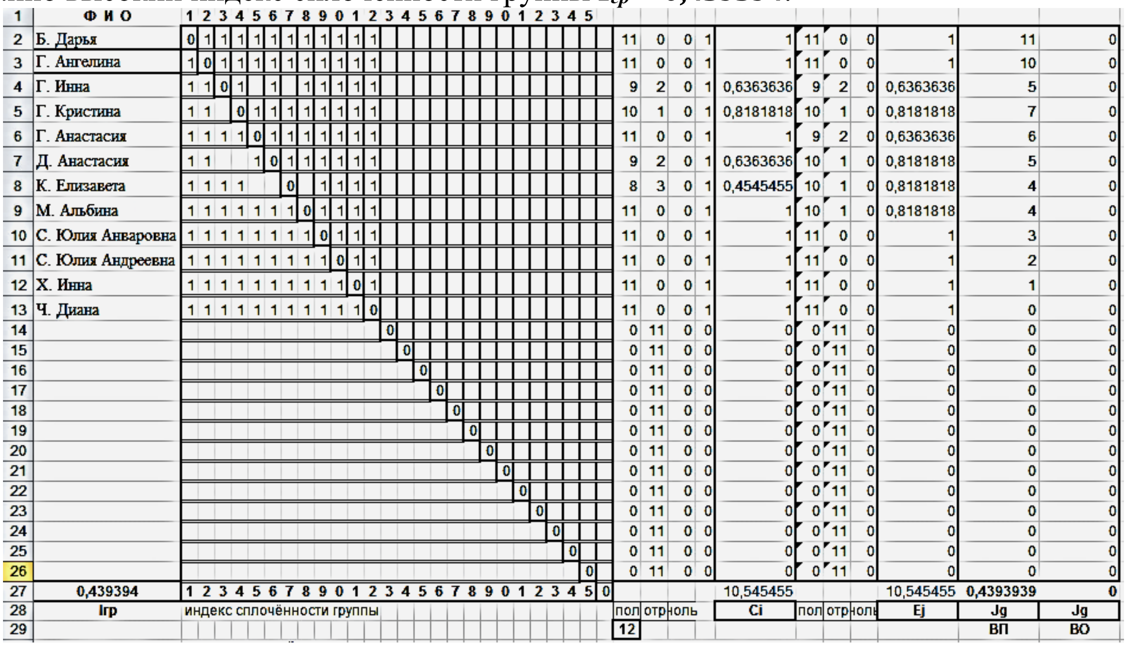


Рис. 5. Оценки времени выполнения заданий для группы ПСП-511 2017/2018

По разным причинам в дальнейших исследованиях участвовали только 12 из 14 человек. Все исследования в группе (уже ПСП-521 – 2018/2019) автору активно помогали проводить любознательные и очень ответственные студентки А.В. Демьяненко и Д.А. Чайкина. Автор выражает огромную благодарность как этим активным студенткам, так и всей учебной группе за участие в социометрии и опросе. В нашем социометрическом исследовании используется непараметрическая процедура, в которой испытуемым предлагается ответить на вопрос социометрической карточки без ограничения выбора [5, 8, 18]:

Приятно или неприятно Вам жить и общаться с данным членом академической группы?

Результаты групповой социометрии приведены на рис. 6. Обращает на себя внимание необычайно высокий индекс сплочённости группы $\boldsymbol{I_{гр} = 0,439394}$.



1	Ф И О	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	
2	Б. Дарья	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1														
3	Г. Ангелина	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1														
4	Г. Инна	1	1	0	1		1		1	1	1	1	1														
5	Г. Кристина	1	1		0	1	1	1	1	1	1	1	1														
6	Г. Анастасия	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1														
7	Д. Анастасия	1	1			1	0	1	1	1	1	1	1														
8	К. Елизавета	1	1	1	1			0		1	1	1	1														
9	М. Альбина	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1														
10	С. Юлия Анваровна	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1														
11	С. Юлия Андреевна	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1														
12	Х. Инна	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1														
13	Ч. Диана	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0														
14														0													
15															0												
16																0											
17																	0										
18																		0									
19																			0								
20																				0							
21																					0						
22																						0					
23																							0				
24																								0			
25																									0		
26																										0	
27	0,439394	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	0
28	Iгр	индекс сплочённости группы																									
29																											

2	11	0	0	1	1	11	0	0	1	11	0
3	11	0	0	1	1	11	0	0	1	10	0
4	9	2	0	1	0,6363636	9	2	0	0,6363636	5	0
5	10	1	0	1	0,8181818	10	1	0	0,8181818	7	0
6	11	0	0	1	1	9	2	0	0,6363636	6	0
7	9	2	0	1	0,6363636	10	1	0	0,8181818	5	0
8	8	3	0	1	0,4545455	10	1	0	0,8181818	4	0
9	11	0	0	1	1	10	1	0	0,8181818	4	0
10	11	0	0	1	1	11	0	0	1	3	0
11	11	0	0	1	1	11	0	0	1	2	0
12	11	0	0	1	1	11	0	0	1	1	0
13	11	0	0	1	1	11	0	0	1	0	0
14	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
15	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
16	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
17	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
18	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
19	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
20	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
21	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
22	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
23	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
24	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
25	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
26	0	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
27					10,545455				10,545455	0,4393939	0
28	пол	отр	ноль		Ci	пол	отр	ноль	Ej	Jg	Jg
29	12									ВП	ВО

Рис. 6. Результаты групповой социометрии для группы ПСП-511 2017/2018, где **Iгр** – индекс сплочённости группы

Одновременно с групповой социометрией был проведён опрос, в ходе которого участницам предлагалось ответить на вопросы: ***когда они испытывали необъяснимое желание учиться данному предмету и почему***. Ответы студенток (без указания фамилий) приведены ниже:

– Чувство было, примерно на 2,3 занятии, неформальная обстановка, интересное преподавание, просмотр фильмов.

– Чувство было, после просмотров фильмов, заинтересованность в преподавателе, послушать истории было притягивающим.

– Чувство было, притягивало прослушивание историй преподавателя.

– Чувство было, после 1-го занятия, заинтересованность в преподавателе, просмотр фильмов, прослушивание историй.

– Чувство было, когда возникло, не помню, привлекали забавные истории и факты.

– Приходить на пары желание не возникало, чувства как такового не было, ничего нового не узнала, преподаватель отличный, умеет находить подход к студентам.

– Нестандартный подход. Увлекательные диалоги на разные темы, которые так или иначе связаны с психологией. Интерес то появлялся, то пропадал.

– Интересный подход к обучению, проведению предмета. Увлекательные фильмы, задания. Заинтересованность начала проявляться в самом начале, 1-2 лекция.

– Чувство присутствовало. Увлекательные передачи, ролики, над темами которых хотелось думать. Хотелось ходить на все занятия. Интерес появился ближе к середине занятий.

– Чувство было. Комфортная, тёплая атмосфера на занятиях. Понравилась форма обучения, объяснение велось доступным языком.

– Оригинальный подход к обучению. Дружная, тёплая атмосфера на занятиях. Понравился формат занятий – диалог, замечательная тренировка для мозга. Помимо слушания дисциплины, привлекали увлекательные и необычные темы для обсуждения, хотелось всё больше и больше узнавать новое, мистическое и поучительное. Интерес появился с самого первого занятия и только усиливался.

– На занятиях всегда было интересно. Привлекает индивидуальный подход преподавателя к студентам. Преподаватель – человек крайне интересный и, по большей части, хотелось ходить на его занятия, чтобы слушать не столько саму дисциплину, а его поучительные, а иногда и мистические истории.

Созданные автором модель и технология обучения устойчиво работают и показывают высокую эффективность: время выполнения заданий уменьшается, количество отличных оценок растёт [11]. В 2018/2019 уч. году автор проводил занятия на этом же факультете и по этому же предмету учебной группе первого курса ПО-511. Как видно из рис. 7 и 8, группа выполнила задания по предмету быстрее, чем группа ПСП-511 2017/2018 и отличных оценок в группе ПО-511 было больше. Как и в учебной группе предыдущего года, в группе ПО-511 студентки посчитали самым трудным – задание 4.

Современные информационные технологии Группа ПО-511 2018/2019 учебный год

№	ФИО	Задание 1	Задание 2	Задание 3	Задание 4	Задание 5	Задание 6	Задание 7	Бонусы, штрафы	Экзамен
1	Б. Марина Николаевна	18.02.2019	11.03.2019? 25.03.2019	11.03.2019		11.09.2019				
2	Б. Юлия Владиславовна	18.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	05.03.2019	11.03.2019	18.03.2019		2	Отлично 21.05.2019
3	Г. Иван Борисович									
4	Г. Дарья Сергеевна	25.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	06.03.20019	11.03.2019	25.03.2019		5	Отлично
5	Г. Николай Николаевич									
6	Г. Виктория Ивановна	04.03.2019	04.03.2019? 11.03.2019	04.03.2019	15.04.2019	11.03.2019	25.03.2019		8	Отлично 21.05.2019
7	Д. Юлия Дмитриевна	18.02.2019	25.02.2019	08.04.2019	01.04.2019	25.03.2019? 26.03.2019	25.03.2019? 26.03.2019? 26.03.2019		6	Отлично 21.05.2019
8	Д. Екатерина Павловна	18.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	04.03.2018	11.03.2019	18.03.2019		1	Отлично 21.05.2019
9	К. Алена Игоревна	18.02.2019	08.04.2019	08.04.2019			26.04.2019			
10	К. Татьяна Сергеевна	18.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	27.03.2019	11.03.2019	08.04.2019		7	Отлично 21.05.2019
11	К. Яна Олеговна	18.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	11.03.2019	11.03.2019	25.03.2019		3	Отлично
12	К. Юлия Юрьевна	18.02.2019	08.04.2019	08.04.2019	09.04.2019	26.04.2019? 27.04.2019	26.04.2019			Отлично
13	К. Алена Алексеевна									
14	Л. Карина Сергеевна	18.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	13.05.2019	11.03.2019	25.03.2019			Отлично 21.05.2019
15	М. Мария Игнатьевна	18.02.2019–	25.02.2019	04.03.2019	11.03.2019	11.03.2019	25.03.2019		4	Отлично 21.05.2019
16	М. Юлия Витальевна	11.03.2019	11.03.2019?? 12.03.2019? 25.03.2019	12.03.2019	15.04.2019	25.03.2019	01.04.2019		9	Отлично 21.05.2019
17	М. Полина Владимировна	25.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	10.04.2019	01.04.2019	01.04.2019		10	Отлично 21.05.2019
18	О. Оксана Андреевна									
19	С. Наталья Александровна	18.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	03.05.2019	25.03.2019	01.04.2019			Отлично 21.05.2019
20	Ф. Никита Николаевич									
21	Х. Мария Витальевна	18.02.2019	25.02.2019	04.03.2019	25.09.2019	11.03.2019	25.03.2019		6	Отлично 21.05.2019
22	Ш. Диана Константиновна	25.02.2019	04.03.2019	25.03.2019	15.04.2019	25.03.2019	30.04.2019			Отлично 21.05.2019
23	Я. Алина Денисовна									

Рис. 7. Страница электронного журнала группы ПО-511

№	Ф.И.О.	Номер зачетной книжки	0			22.04.2019	ес точки, %			50%	очка 2			24.06.2019	ес точки, %			50%	Над-бав-ка, %	Итоговый процент				Оценка по рейтингу	01.07.2019 Экзамен	Итог	Фактическая дата выставления оценки
			Тек	Пр.	Lab	Др.	50%	67%	84%	100%	Тек	Пр.	Lab	Др.	50%	67%	84%	100%		50%	67%	84%	100%				
			10%	22%	0%	68%	неуд	уд.	хор	отл.	8%	22%	2%	68%	неуд	уд.	хор	отл.		неуд	уд	хор	отл				
1	Б. Марина Н.	ПО-1823	100	100		100				100	50	73	100	74			72						86	Отл		Отл	
2	Б. Юлия В.	ПО-1801	100	100		100				100	75	91	100	100				96					98	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
3	Г. Иван Б.	ПО-1802				1	1					5			1					1				Неуд		Неуд	
4	Г. Дарья С.	ПО-1803	100	100		100				100	75	82	100	100				94					97	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
5	Г. Николай Н.	ПО-1804				1	1					9			2					1				Неуд		Неуд	
6	Г. Виктория И.	ПО-1805	100	100		100				100	88	91	100	100				97					99	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
7	Д. Юлия Д.	ПО-1806	100	100		100				100	63	73	100	97				89					95	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
8	Д. Екатерина П.	ПО-1807	100	100		100				100	100	100	100	100				100					100	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
9	К. Алена И.	ПО-1808	100	100		100				100	50	73		71			68						84	Отл		Отл	
10	К. Татьяна С.	ПО-1809	100	100		100				100	75	91	100	100				96					98	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
11	К. Яна О.	ПО-1810	100	100		100				100	75	91	100	100				96					98	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
12	К. Юлия Ю.	ПО-1811	100	100		100				100	75	82	100	97				92					96	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
13	К. Алена А.	ПО-1812				1	1					9			2					1				Неуд		Неуд	
14	Л. Карина С.	ПО-1813	100	100		100				100	75	73	100	97				90					95	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
15	М. Мария И.	ПО-1814	100	100		100				100	75	100	100	97				96					98	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
16	М. Юлия В.	ПО-1815	100	100		100				100	75	73	100	94				88					94	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
17	М. Полина В.	ПО-1816	100	100		100				100	75	91	100	97				94					97	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
18	О. Оксана А.	ПО-1817				1	1					14			3					2				Неуд		Неуд	
19	С. Наталья А.	ПО-1819	100	100		100				100	75	91	100	88				88					94	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
20	Ф. Никита Н.	ПО-1820	80	64		71			70		50	45		74		64						67		Хор	Хор	Хор	21.05.2019
21	Х. Мария В.	ПОZ-1806	100	100		100				100	50	82	100	88				84					92	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
22	Ш. Диана К.	ПО-1821	100	100		100				100	75	82		97				90					95	Отл	Отл	Отл	21.05.2019
23	Я. Алина Д.	ПО-1822				1	1					9			2					1				Неуд		Неуд	
			ичество студен				5	0	1	17	ичество студен				5	1	2	15		5	0	1	17	23			

Рис. 8. Фрагмент электронной ведомости группы ПО-511

Автору удалось провести в группе ПО-511 небольшой опрос. Вопросы и ответы приведены ниже:

1. ***Что мешало сделать задания быстрее?***

- домашние задания по другим предметам.

2. ***Что помогало сделать так быстро?***

– хороший учитель;

– нравится предмет;

- интересные задания;
- подробное описание выполнения задания (матрица смысла [6]);
- предоставление примеров заданий;
- предоставление программ для выполнения;
- свобода выбора темы задания (презентация, видео);
- выполнение заданий в электронном виде.

Выводы:

1. Авторская модель и технология обучения разработаны на основе синергетики и взаимного обучения и усовершенствованы с использованием идей теории множественных интеллектов Г. Гарднера, а также элементов автодидактики В.А. Куринского. Предложенные автором модель и технология обучения устойчиво работают на протяжении многих лет.

2. После получения ответа на вопрос о фрактальности группы людей удалось установить, что учебная группа, состоящая из людей, обладает свойством фрактальности. Это означает, что учебная группа людей обладает всеми свойствами самоорганизующейся системы.

3. В результате обучения учебной группы ПСП-511 2017/2018 был обнаружен неизвестный ранее системный эффект. По словам обучаемых, под действием какой-то непонятной, необъяснимой силы им неудержимо хотелось учиться. И такого с ними ещё не было ни с одним преподавателем. Автор, как преподаватель может лишь предположить, что в группе ПСП-511 была удачно создана обстановка конструктивного хаоса, которая, возможно, и стала той необъяснимой силой, под действием которой студенткам захотелось учиться.

4. По данным электронного журнала обучения группы ПСП-511 2017/2018 (диаграммы выполнения заданий во времени) обнаружено необычайно высокое количество лидеров обучения в группе из 14 человек. Среднее количество лидеров равно 10,333333, среднее количество лидеров в долях равно 0,738095.

5. В группе были проведены групповая социометрия и опрос. Обращает на себя внимание полученный в результате групповой социометрии необычайно высокий индекс сплочённости группы $I_{гр} = 0{,}439394$ (максимальное значение этого показателя $I_{гр} = 0{,}5$).

6. По данным опроса большинство испытуемых отмечали появление чувства (желания учиться данному предмету), заинтересованность в преподавателе, интересный, нестандартный подход к обучению, тёплую, комфортную, неформальную обстановку на занятиях. Притягивали просмотр фильмов и прослушивание историй (истории о непознанном, которые многие студентки восприняли как мистические). Студенткам понравился формат занятий – диалог и вопросы, задаваемые преподавателем во время занятий – замечательная тренировка для мозга. Дальнейшие исследования обнаруженного неизвестного ранее системного эффекта продолжаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 15x4 – 15 минут про фракталы [Электронный ресурс] https://www.youtube.com/watch?v=EViaG2nM2hE (дата обращения 12.05.2018)

2. Баранник, Н.С. Взаимное обучение как модификация парного обучения / Н.С. Баранник, В.Ф. Горбатюк // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6(2) – с. 350–354.

3. Википедия. Фракталы. [Электронный ресурс] https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1169258 (дата обращения 11.05.2018)

4. Гарднер, Говард. Структура разума: теория множественного интеллекта: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильяме», 2007. – 512 с.

5. Горбатюк, А.Н. Программирование электронной таблицы Microsoft Excel для обработки информации, полученной при социометрических исследованиях (глава I, раздел 1.9 коллективной монографии) – Научные исследования: информация, анализ, прогноз: монография/

[В.П. Аникина, Е.В. Василенко, А.Н. Горбатюк и др.]; под общей ред. проф. О.И. Кирикова. – Книга 11. – Воронеж: ВГПУ, 2006. – 412 с., с. 119-132.

6. *Горбатюк, В.Ф.* Матрицы переходов для исследования динамики смыслового развития // Категории смысла в философии, психологии, психотерапии и в общественной жизни: мат-лы всерос. психол. конф. с международ. участием. 23-26 апр. 2014 г. Ростов-на-Дону. – М.: КРЕДО, 2014. – С. 175–178.

7. Горбатюк, В.Ф. Модель обучения на основе синергетики и методе мета-проектов // Фундаментальные исследования. – 2012. – №6(2). – с. 355–359.

8. Горбатюк, В.Ф., Демьяненко, А.В., Чайкина, Д.А. Некоторые эффекты, обнаруженные при обучении группы 1-го курса ПСП-511 – 2017/2018. – Проблемы методологии и опыт практического применения синергетического подхода в науке: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Самара, 13 ноября 2018 г.). - Стерлитамак: АМИ, 2018. - 323 с., с. 45-55.

9. Горбатюк, В.Ф. Обработка данных электронного журнала учёта результатов обучения. // Вестник Таганрогского государственного педагогического института имени А.П. Чехова. Гуманитарные науки. Специальный выпуск №1. – Таганрог: Изд-во Таганрог. пед. ин-та имени А.П. Чехова. 2013. – 214 с., с. 7–13.

10. 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.

11. 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.

12. Горбатюк, В.Ф. Самоорганизация, саморазвитие, обучение и взаимное обучение систем естественного интеллекта: монография/ Таганрог–Ростов-на-Дону: Легион-М, 2016.- 240 с.

13. Горбатюк, В.Ф. Синергетика в современном обучении: Монография – Таганрог: Изд-во Таганрог. гос. пед. ин-та им. А.П. Чехова, 2012. – 208 с.

15. Горбатюк, В.Ф. Системы естественного интеллекта: синергетика образования: монография – Таганрог – Ростов-на-Дону: Изд-во «Легион-М», 2018. – 256 с.

16. Горбатюк, В.Ф. Эмерджентность и конструктивный хаос в авторской модели самообучения // Школа будущего. – 2013. – № 2. – с. 3–11.

17. Куринский, В.А. Постпсихологическая автодидактика: монография [в 2 ч.]. Часть 1: Лекции: монография /В.А. Куринский// Киев: ЗАО «Віпол», 2006. – 408 с.

18. Куринский, В.А. Постпсихологическая автодидактика: монография [в 2 ч.]. Часть 2: монография /В.А. Куринский// Киев: ЗАО «Віпол», 2006. – 660 с.

19. Морено, Я. Л. Социометрия: Экспериментальный метод и наука об обществе. – М.: Академический проект. 2004. – 320 с.

20. Положение об организации учебного процесса в Ростовском государственном экономическом университете (РИНХ) с использованием зачётных единиц (кредитов) и балльно-рейтинговой системы. Утверждено ректором ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)» 24.09.2013.

21. Пригожин, И., Стенгерс, И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой: Пер. с англ./ Общ. ред. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича и Ю.Л. Сачкова. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.

22. Фрактал.[Электронный ресурс] https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B0%D0%BB (дата обращения 11.05.2018)

23. Haken, Hermann. Synergetics: An Introduction. / Springer Science& Business Media, 390 pages, 2013.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-537-543

Горбунов Александр Валерьевич, Лызь Александр Евгеньевич

Южный федеральный университет

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ CDIO

Аннотация. *В статье рассмотрен поэтапный процесс разработки системы оценивания результатов проектной деятельности в соответствии с требованиями стандартов CDIO. На примере проектов базового уровня, реализуемых в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, сформирован перечень результатов обучения, выбраны категории методов оценивания и средства оценивания, проведено их распределение по результатам обучения и по этапам проектной деятельности, приведён пример составления мини-спецификации средств оценивания.*

Ключевые слова: *концепция CDIO, CDIO Syllabus, результаты обучения, проектное обучение, инженерное образование*

Annotation. *Process of developing a system for evaluating the results of project activities in accordance with CDIO are considered. On the example of the Institute of Computer Technologies and Information Security of the Southern Federal University, a list of learning outcomes is generated, categories of assessment methods and assessment tools are selected, their distribution according to learning outcomes and stages of project activities is carried out, an example of compiling a mini-specification of assessment tools is given.*

В современных условиях решение задачи совершенствования подготовки инженерных кадров предполагает учёт определённых требований к организации образовательного процесса [1], [2], [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; рус. «Планирование – Проектирование – Применение – Производство») – международный проект по реформированию инженерного образования и преодолению существующего разрыва между теорией и практикой в подготовке будущих инженеров [3]-[6].

Одним из стандартов CDIO является стандарт 12 «Оценка программы». В соответствии с описанием данного стандарта, оценка образовательной программы представляет собой суждение о полноценности программы, основанное на доказательствах продвижения программы к достижению заявленных целей. Доказательства полноценности образовательной программы могут быть собраны с использованием мнений преподавателей, данных входных и итоговых собеседований, отчётов внешних экспертов, дополнительных исследований с привлечением выпускников и работодателей, а также оценок отдельных дисциплин или видов деятельности.

В качестве примера разработки системы оценивания проектной деятельности в соответствии с требованиями стандартов CDIO рассмотрим творческий проект базового уровня,

выполняемый в рамках дисциплины «Введение в инженерную деятельность» в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета.

Общая трудоёмкость дисциплины «Введение в инженерную деятельность» (включающей в свой состав лекционные занятия в 1 семестре, выполнение творческого проекта №1 (базовый уровень) в 2-3 семестрах и творческого проекта №2 (продвинутый уровень) в 3-4 семестрах) – 8 з.е. (288 часов), из них непосредственно на творческий проект №1 приходится 3 з.е.: 54 часа практических занятий и 54 часа самостоятельной работы.

В качестве тематик проектов базового уровня, реализуемых в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, можно выделить ряд типовых направлений (в скобках указаны темы реализованных обучающимися проектов):

– информационные системы («Абитуриент», «Моя библиотека», «Предприятие», «Тренажёр для практических занятий по курсу Математическая логика»)

– компьютерные игры («Квадрокоптер», «XoniX», Десант», «Докер»);

– мобильные приложения («Менеджер проектов», «Определение местоположения пользователя по сигналам беспроводных стационарных устройств», Интернет-тренажёр по курсу Информатика, «StepChat», «Приложение для iOS – индивидуальное расписание студента»);

– мобильные игровые приложения («Пятнашки», «Три в ряд», «Крылатые выражения», «Нить Ариадны», «Пакман»);

– программные модули («Сравнение текстов программ на синтаксическую идентичность», «Автоматическая рассылка писем участникам олимпиады ContestSFedU», «Сетевое оповещение для видеотрансляции»).

Для разработки системы оценивания результатов проектной деятельности в соответствии с требованиями стандартов CDIO необходимо предварительно сформировать входные требования: перечень результатов обучения на основе CDIO Syllabus, требуемых и формируемых дисциплинами, имеющих пререквизиты.

В рассматриваемом примере среди дисциплин, которые предшествуют выполнению проекта базового уровня и имеют наиболее важное значение для достижения результатов обучения, можно выделить «Введение в инженерную деятельность» (1 семестр), «Информатика» (1 семестр), «Основы алгоритмизации и программирования» (1 семестр), «Психология профессионального саморазвития» (2 семестр). Перечень и распределение результатов обучения CDIO Syllabus по указанным дисциплинам приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Результаты обучения CDIO Syllabus по дисциплинам, предшествующим выполнению проекта

Наименование дисциплины (семестры реализации)	Результаты обучения CDIO Syllabus													
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Введение в инженерную деятельность (1 семестр)				+	+		+	+	+	+				
Информатика (1 семестр)		+									+	+	+	+
Основы алгоритмизации и											+	+	+	+

программирования (1 семестр)														
Психология профессионального саморазвития (2 семестр)			+	+	+	+	+							

В таблице 1 (а также в последующих таблицах 2-5) указаны следующие результаты обучения CDIO Syllabus:

1. Дисциплинарные и технические знания;
2. Личностные и профессиональные компетенции:
2.1. Аналитическое обоснование и решение проблем;
2.2. Экспериментирование, исследование и приобретение знаний;
2.3. Системное мышление;
2.4. Позиция, мышление и познание;
2.5. Этика, справедливость и другие виды ответственности;
3. Межличностные навыки и умения:
3.1. Работа в команде;
3.2. Коммуникации;
3.3. Коммуникация на иностранных языках;
4. Планирование, проектирование, производство и применение:
4.1. Социальный и экологический контекст;
4.2. Предпринимательский и деловой контекст;
4.3. Планирование, системный инжиниринг и менеджмент;
4.4. Проектирование;
4.5. Производство;
4.6. Применение.

Проект базового уровня выполняется в рамках дисциплины «Введение в инженерную деятельность» в 2-3 семестрах и предназначен для формирования следующих результатов обучения CDIO Syllabus (таблица 2):

Таблица 2 – Результаты обучения CDIO Syllabus, формируемые при выполнении проекта базового уровня

Наименование дисциплины (семестры реализации)	Результаты обучения CDIO Syllabus														
	1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Введение в инженерную деятельность (2-3 семестры)	+	+	+			+	+	+				+	+	+	

Далее необходимо провести выбор методов оценивания и соотнести их с требуемыми результатами обучения CDIO Syllabus.

При оценивании результатов выполнения проекта базового уровня в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета используются следующие категории методов оценивания:

– письменные и устные вопросы: устные опросы на лекционных и практических занятиях по дисциплине «Введение в инженерную деятельность»; реферат (1 семестр); пояснительная записка к творческому проекту;

– рубрики (оценочные шкалы): работа в команде при выполнении проекта, презентация проекта;

– продукты и проекты (моделирование): демонстрация результатов выполненного проекта;

– публикации и портфолио: конференция (результаты выполненного проекта докладываются в рамках студенческой конференции с возможностью обсуждения как с преподавателями, так и со своими коллегами – студентами);

– рефлексия: самоотчёт (ход выполнения проекта).

Соотнесение результатов обучения CDIO Syllabus и используемых методов оценивания приведено в таблице 3:

Таблица 3 – Соотнесение результатов обучения CDIO Syllabus и используемых методов и средств оценивания проектов базового уровня

Методы и средства оценивания	Результаты обучения CDIO Syllabus														
	1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
Устные опросы	+	+	+					+							
Реферат	+														
Пояснительная записка к проекту		+	+									+	+	+	
Работа в команде						+	+	+							
Презентация проекта		+					+	+							
Демонстрация результатов проекта												+	+	+	
Конференция							+	+							
Самоотчёт		+	+			+									

Выбранные методы и средства оценивания по этапам проектной деятельности распределены следующим образом (таблица 4):

Таблица 4 – Распределение методов и средств оценивания по этапам проектной деятельности

До начала проектной деятельности	В процессе проектной деятельности	По окончанию проектной деятельности
Устные опросы (1, 2.1, 2.2, 3.2)	Пояснительная записка к проекту (2.1, 2.2)	Презентация проекта (2.1, 3.1, 3.2)
Реферат (1)	Работа в команде (2.5, 3.1, 3.2)	Демонстрация результатов проекта (4.3, 4.4, 4.5)
—	Самоотчёт	Конференция

	(2.1, 2.2, 2.5)	(3.1, 3.2)

Следует отметить, что в практике реализации творческих проектов в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета методы взаимооценивания, оценивание преподавателями смежных дисциплин, оценивание потенциальными работодателями, другими заинтересованными лицами используются на этапе защиты творческих проектов: в комиссии по защите проектов обязательно включаются преподаватели смежных дисциплин, а также либо представители работодателей, либо представители сторонних образовательных учреждений. Защита проектов осуществляется в формате конференции, на которой могут присутствовать любые заинтересованные лица, в том числе и сами обучающиеся, поэтому в ходе обсуждения результатов проектов используются и методики взаимооценивания студентами друг друга. Методы самооценивания заложен в самоотчёт, оформляемые студентами в ходе выполнения проекта.

Соотнесение оценивающих лиц и методов и средств оценивания представлено в таблице 5:

Таблица 5 – Распределение методов оценивания по оценивающим лицам

Оценивающие лица	Методы оценивания
Преподаватель	Устные опросы, реферат, пояснительная записка к проекту, работа в команде
Студенты	Самоотчёт, работа в команде
Группа	Презентация проекта, демонстрация результатов проекта, конференция
Преподаватели смежных дисциплин	Презентация проекта, демонстрация результатов проекта, конференция
Работодатели	Презентация проекта, демонстрация результатов проекта, конференция
Другие заинтересованные лица	Презентация проекта, демонстрация результатов проекта, конференция

При выборе используемых методов и средств оценивания необходимо учитывать их трудоёмкость. При оценивании проектов базового уровня в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета заложена следующая трудоёмкость методов и средств оценивания:

Устные опросы – на лекционных и практических занятиях отводится по 5-15 минут на устные опросы обучающихся. Устные опросы позволяют своевременно корректировать ход занятий, следить за развитием мысли обучающихся, за их коммуникативными возможностями.

Реферат – по окончанию 1 семестра обучения (предшествующего выполнению творческого проекта) обучающие готовят реферат на тему «Особенности инженерной деятельности и роль инженера в современном мире». Трудоёмкость оценивания реферата – 5-10 минут на одну работу.

Пояснительная записка к проекту – в ходе выполнения проекта оформляется пояснительная записка к проекту, к которой предъявляются определённые требования к оформлению, содержанию и грамотности описания решаемой задачи. Трудоёмкость оценивания пояснительной записки – 10-15 минут на один проект.

Работа в команде – в основном оценивается руководителями проектов в ходе их выполнения. Отдельных контрольных мероприятий для оценивания командной работы не предполагается, оценка выносится на основе субъективно сложившегося мнения о вкладе того

или иного участника в выполнение проекта. Оценка может корректироваться на основе анализа самоотчётов студентов. Трудоёмкость оценивания – 5-10 минут на один проект.

Презентация проекта – оценивается способность донести и раскрыть сущность проекта до широкого круга лиц (техническая суть проекта вынесена в следующий вид оценивания – демонстрация результатов проекта). Презентация проекта складывается из презентации предварительных результатов проекта и защиты проекта. На каждый из видов презентации (время доклада) можно отвести по 5 минут (без учёта непосредственно демонстрации результатов проекта), таким образом суммарная трудоёмкость составит 10 минут.

Демонстрация результатов проекта – данный метод оценивания выделен из презентации проекта и предназначен непосредственно для демонстрации технической части проекта и фактически достигнутых результатов. Трудоёмкость оценивания – около 5 минут на один проект.

Конференция – данный метод оценивания учитывает обсуждение представленных результатов проекта, используется в том числе для вовлечения других обучающихся во взаимооценивание результатов друг друга. Трудоёмкость оценивания – около 5 минут (время обсуждения проекта в рамках конференции) на один проект.

Самоотчёт – данный метод оценивания используется для рефлексии студентов при работе над проектом. Обязательного оценивания не требуется, время анализа результатов самоотчётов для оценивания вклада в командную работу уже учтено в методе оценивания «Работа в команде».

Суммарную трудоёмкость всех методов оценивания по одному проекту можно оценить в 45-75 минут (проект выполняется в 2-3 семестрах, устные опросы на лекционных и практических занятиях по дисциплине «Введение в инженерную деятельность» также осуществляются и в течение 1 семестра). Таким образом, суммарная трудоёмкость оценивания не представляется избыточным и укладывается в нормативы времени для осуществления промежуточных видов контроля (зачёт, курсовой проект).

По каждому виду оценивания должны быть разработаны критерии оценивания результатов обучения и уровни сформированности результатов обучения. Критерии оценивания фиксируются в фондах оценочных средств рабочей программе дисциплины [1, 7].

Результатом разработки системы оценивания проектной деятельности в соответствии с требованиями стандартов CDIO будут являются мини-спецификации для отдельных методов и средств оценивания, в которых для каждого используемого метода или средства оценивания фиксируются его наименование, оцениваемые результаты обучения, период оценивания, срок предоставления работ, кем проводится оценивание, возможность апелляции и т. п.

В качестве примера рассмотрим мини-спецификацию средства оценивания «Презентация проекта»:

1. Оцениваемые результаты обучения (по CDIO Syllabus): 2.1 Аналитическое обоснование и решение проблем, 3.1 Работа в команде, 3.2 Коммуникации.
2. Критерии оценивания: изложены в рабочей программе дисциплины.
3. Период (время) оценивания: во время недели академической мобильности (9 неделя 3 семестра).
4. Срок представления работ, выполняемых в процессе оценивания: за 1 неделю до презентации проекта (8 неделя 3 семестра).
5. Кем проводится оценивание: независимая комиссия, в которую включаются представители работодателей либо сторонних образовательных учреждений. Оценивание осуществляется с учётом демонстрации результатов проекта и обсуждения в рамках конференции.
6. Возможность апелляции: не предусмотрена.

К основным способам использования результатов оценивания в организации образовательного процесса в вузе и разработке образовательных программ можно отнести учёт обратной связи со стороны ключевых стейкхолдеров (в данном случае – работодатели, руководители проектов, сторонние преподаватели, студенты). Учёт результатов оценивания, как правило, приводит к необходимости корректировки тематик проектов и изменению критериев оценивания.

Таким образом, при разработке системы оценивания проектной деятельности в соответствии с требованиями стандартов CDIO необходимо дать общее описание проектов; выделить предшествующие дисциплины, имеющие наиболее важное значение для достижения заданных результатов обучения по проекту; сформировать перечень результатов обучения в рамках выполнения проекта; выбрать категории методов оценивания и средства оценивания; провести их распределение по результатам обучения и по этапам проектной деятельности; провести оценку трудоёмкости каждого из методов оценивания; разработать подробные критерии оценивания и составить мини-спецификации для отдельных методов и средств оценивания.

При внедрении в организацию образовательного процесса планирования системы средств оценивания возможно возникновение ряда сложностей. Например, в Институте компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета используемые в данный момент способы оценивания и результаты обучения ещё не соотнесены с результатами обучения CDIO Syllabus, поэтому не всегда возможно провести декомпозицию имеющегося фонда оценочных средств по дисциплинам с требованиями CDIO Standards и CDIO Syllabus. При этом, безусловно, планирование системы средств оценивания для образовательной программы и отдельных дисциплин вынуждает разработчиков применять системный подход при разработке программ отдельных дисциплин, задумываться о целесообразности и полноте контроля отдельных результатов обучения, о выборе оптимальных оценочных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов А.В., Лызь А.Е., Борисова Е.А. Планирование результатов обучения по инженерным образовательным программам в соответствии с концепцией CDIO // Сборник научных трудов VIII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». – ЮФУ, 2017. – 2017. – С.419-427.
2. 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.
3. Трещев А.М., Сергеева О.А. Всемирная инициатива CDIO как контекст профессионального образования // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – С. 232.
4. Чучалин А.И. модернизация инженерного образования на основе международных стандартов CDIO // Инженерное образование. – 2014. – № 16. – С. 14-29.
5. Никифоров В.И., Черненькая Л.В. Всемирная инициатива CDIO в российском образовании // Alma mater (Вестник высшей школы). – 2015. – № 3. – С. 8-12.
6. 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.
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.

VI. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-544-551

Битюцкая Наталья Ивановна (1), Битюцкий Андрей Олегович (2)

1. Северо-Кавказский федеральный университет
2. Московский институт стали и сплавов

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ РФ

Аннотация. *Выполнен анализ нормативной и методической базы, регламентирующей процесс подготовки прогнозов социально-экономического развития регионов РФ. Описаны методы, наиболее подходящие для прогнозирования динамики регионального развития. Рассмотрены программные продукты, применяемые для построения прогнозов. Описана программа «2П Прогноз», разработанная при участии авторов для заполнения унифицированной формы 2П представления регионального прогноза. Предложены пути решения выявленных проблем построения прогнозов.*

Ключевые слова*: прогнозирование, региональное социально-экономическое прогнозирование, методы прогнозирования, программы для прогнозирования, форма 2П.*

Annotation*. The analysis of the regulatory and methodological framework governing the process of preparing forecasts of socio-economic development of the regions of the Russian Federation. The methods that are most suitable for predicting the dynamics of regional development are described. Considered software products used to build forecasts. The program "2P Prognoz", developed by the authors for filling in the unified form 2P of regional forecast presentation, is described. Proposed solutions to the identified problems of building forecasts.*

Keywords: *forecasting, regional socio-economic forecasting, forecasting methods, forecasting software, form 2П.*

Введение.

Анализ и прогнозирование социально-экономического развития (СЭР) является основой при решении задач по управлению устойчивым развитием региона. На основе обоснованного прогноза определяются цели социально-экономического развития региона, уточняются программные мероприятия и приоритеты, разрабатывается государственный бюджет региона.

Каждый российский регион обязан разрабатывать три вида прогнозов [1]:

– краткосрочные прогнозы определяют текущие цели и задачи, направленные на улучшение экономической и социальной ситуации в регионе;

– среднесрочные прогнозы необходимы для подготовки правительственных программ развития на среднесрочную перспективу;

– долгосрочные прогнозы являются основой для выработки концепций социально-экономического развития регионов.

Процессы прогнозирования и планирования на уровне регионов РФ постоянно исследуются российскими учеными [4,5]. Актуальными являются следующие проблемы:

– недостаточное организационное и методическое обеспечение процесса стратегического планирования на уровне муниципальных образований;

– в методических рекомендациях Минэкономразвития России к разработке прогнозов приводится перечень факторов, влияющих на прогнозные показатели, однако включение в модель того или иного фактора существенно зависит от специфики региона;

– невысокий уровень системности прогнозных расчетов, недоучет взаимосвязи между прогнозными показателями;

– отсутствие критериев оценки качества прогнозов и процедуры контроля качества подготовки прогнозных документов в регионах;

– разнородность информационного и программного обеспечения, используемого в регионах для построения прогнозов.

Целью исследования является изучение процесса социально-экономического прогнозирования в регионах и поиск путей решения вышеперечисленных проблем.

Законодательная и методическая база прогнозирования СЭР регионов РФ

В соответствии со статьей 35 Федерального Закона от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ "О стратегическом планировании в Российской Федерации" прогноз СЭР субъекта РФ на среднесрочный период разрабатывается ежегодно на основе прогноза СЭР РФ на среднесрочный период, стратегии социально-экономического развития субъекта РФ с учетом основных направлений бюджетной и налоговой политики [1].

Прогноз показателей СЭР субъектов РФ до настоящего года осуществлялся на основе методических указаний, утвержденных приказом Минэкономразвития России № 243 от 30 июня 2016 г. [3]. В марте 2019 года вышел новый приказ [2], в соответствии с которым изменена форма (2П) представления прогнозных показателей и методика расчета некоторых из них.

С 2017 года прогноз должен разрабатываться в трех вариантах: базовом, консервативном и целевом [3]. На первом этапе прогнозируются сценарные условия функционирования экономики РФ в трех вариантах. На втором этапе на основе сценарных условий и основных параметров среднесрочного прогноза, одобренных Правительством РФ, разрабатывается прогноз СЭР региона [2].

Рекомендуемая Минэкономразвития РФ форма «2П» представления прогноза социально-экономических показателей регионов РФ состоит из следующих 14-ти разделов: население, валовой региональный продукт, промышленное производство, сельское хозяйство, строительство, торговля и услуги населению, внешнеэкономическая деятельность, малое и среднее предпринимательство, инвестиции, консолидированный бюджет субъекта РФ, денежные доходы населения, труд и занятость, основные фонды, финансы организаций [2]. Форма содержит 153 показателя, причем для расчета и прогноза каждого из них используются различные формулы и методы. Каждому субъекту РФ приходится заполнять данную форму, как минимум, два раза в год.

Минэкономразвития каждого региона РФ разрабатывает для подчиненных ему муниципальных образований (МО) собственные методические указания для подготовки среднесрочного прогноза СЭР МО и заполнения формы 2П. Зачастую данные указания не учитывают территориальную специфику и взаимосвязь между прогнозными показателями.

Анализ методов прогнозирования СЭР регионов

Методы прогнозирования постоянно совершенствуются. Известно более сотни различных методов разработки прогнозов, но в качестве основных на практике используются лишь 15-20.

Для разработки социально-экономических прогнозов наиболее часто применяются следующие группы методов [4].

1. Методы экстраполяции основаны на выявлении устойчивых тенденций в прошлом и их переносе в будущее (тренд с подбором функциональной зависимости, методы усреднения и методы адаптивного сглаживания). Используются в случае, если анализ динамики отдельных показателей на ретроспективном периоде показал, что последующие значения показателя в

наибольшей степени определяются не изменением других факторов, а динамикой этого же показателя в предшествующие периоды.

2. Методы моделирования используются в случае, если выделены факторы, оказывающие наибольшее влияние на прогнозный показатель, и определен характер зависимости.

3. Метод экспертных оценок основан на мнении специалистов в конкретной предметной области и применяется для подготовки сценарных условий на первом этапе прогнозирования.

4. Нормативные методы применяются тогда, когда значение отдельных показателей в каждый момент времени однозначно определяется по заданным формулам.

Выбор конкретного метода проводится по результатам анализа динамики показателя на ретроспективном периоде и должен быть обоснован при проверке качества модели.

В настоящее время при прогнозировании социально-экономических процессов активно применяются адаптивные методы, основанные на предположении, что более поздние значения временного ряда более информативны и имеют больший вес, чем более ранние. Адаптивные методы используются в условиях сильных колебаний значений динамического ряда и удачно используются при краткосрочном прогнозировании.

Одним из методов адаптивного сглаживания является метод экспоненциального сглаживания, который основывается на усреднении временных рядов прошлых наблюдений в экспоненциально нисходящем направлении, т.е. всем значениям присваиваются веса, которые убывают по экспоненте. Метод экспоненциального сглаживания дает возможность получить оценку параметров тренда, характеризующих не средний уровень процесса, а тенденцию, сложившуюся к моменту последнего наблюдения [4].

Для прогнозирования любых социально-экономических процессов широко используются методы моделирования: модели оптимального прогнозирования, эконометрические (факторные) модели и имитационные модели.

В советский период особо актуален был метод межотраслевого баланса. В современных условиях развития экономики крайне сложно применять данный метод, так как не существует нормативов потребления и производства продукции.

Среди *эконометрических моделей* выделяют однофакторные и многофакторные модели [4]. На первом этапе построения многофакторной модели на основе ретроспективной информации по объекту прогнозирования и независимым факторам определяется вид зависимости между ними. На следующем этапе строятся прогнозы независимых факторов (сценарные условия СЭР). Для построения прогноза в уравнение найденной зависимости подставляются значения независимых переменных.

Методы имитационного моделирования являются прекрасным, современным инструментом анализа и прогнозирования во многих областях. Но для построения имитационных моделей требуются навыки программирования и глубокие знания статистики. Поэтому данный аппарат является слишком трудозатратным для российских регионов.

В методических указаниях Минэкономразвития России для разработки прогнозов СЭР регионов рекомендованы методы экстраполяции и многофакторные регрессионные модели [3]. Грамотное сочетание этих методов позволит получить согласованные и непротиворечивые прогнозы.

Анализ программного обеспечения для прогнозирования

На современном рынке программного обеспечения имеется большое количество продуктов, позволяющих выполнять прогнозирование:

- табличные процессоры Microsoft Excel, OpenOffice, LibreOffice;
- статистические пакеты Statistica, SPSS;
- программы для эконометрического анализа E-views, Gretl;
- пакеты бизнес аналитики и прогнозирования ForecastPro и Prognoz;

– системы имитационного моделирования Pilgrim, AnyLogic, iThink, Simulink, GPSS;
– программа интеллектуального анализа данных Deductor.

Перечисленные программы, безусловно, обладают богатыми возможностями, но для освоения большинства из них требуется хорошее математическое образование.

К сожалению, в настоящий момент нет единой программы, рекомендованной Минэкономразвития России для заполнения формы «2П», поэтому каждый субъект РФ решает эту задачу по-своему.

Особого внимания заслуживает разработанная российской компанией «Прогноз» платформа бизнес аналитики Prognoz Platform. Этот программный продукт предназначен для моделирования и прогнозирования бизнес-процессов, визуализации и оперативного анализа данных, создания бизнес-приложений. Прогнозно-аналитические системы на основе данной платформы успешно функционируют сегодня в организациях государственного, корпоративного и финансового секторов [6].

Бесспорным преимуществом Prognoz Platform является ее постоянное совершенствование в соответствии с требованиями времени и изменениями российской нормативно-методической базы.

Для решения задач прогнозирования, управления и имитации применяется широкий класс методов моделирования, в том числе эконометрических, балансовых, оптимизационных, целевых.

Одно из решений компании «Прогноз» предназначено для прогнозирования социально-экономического развития регионов России и позволяет выполнять:

– долгосрочный прогноз развития субъекта РФ;
– среднесрочный прогноз показателей формы 2П;
– прогноз финансовой устойчивости региональных бюджетов.

Единственным недостатком программных решений компании «Прогноз» является достаточно высокая стоимость их приобретения и поддержки, что немаловажно, особенно для сельских регионов.

В 2014 году по заявке администрации одного из районов Ставропольского края при участии автора статьи был разработан специализированный программный продукт «2П Прогноз», предназначенный для автоматизации заполнения формы 2П, одобренный Минэкономразвития СК. Получено свидетельство о государственной регистрации данной программы для ЭВМ [7].

На рисунке 1 представлено диалоговое окно программы «2П Прогноз», используемое для заполнения раздела «Население» формы 2П. Для заполнения каждого из разделов формы создано свое диалоговое окно и реализован расчет параметров прогноза по формулам в соответствии с методическими указаниями Минэкономразвития Ставропольского края.

Для расчета прогнозных значений использовались методы линейной экстраполяции и экспоненциального сглаживания. Программа автоматически выбирает ту модель прогнозирования, которая даёт наименьшее среднеквадратическое отклонение от ретроспективных значений показателей социально-экономического развития. Реальные и прогнозируемые значения показателей сохраняются в базе данных, в результате накапливаются данные для более точного анализа и прогноза.

Рисунок 1 - Диалоговое окно программы «2П Прогноз»

В связи с внесением в 2016 и 2019 годах изменений в методику заполнения формы 2П, требуется доработка данного программного продукта.

Анализ изменений в методике расчета основных показателей СЭР регионов

С 2017 года показатели прогноза должны рассчитываться уже не в двух, а в трех вариантах, поэтому необходимо добавить в программу расчет целевого варианта прогноза. Изменения в 2019 году методики расчета коснулись, в основном, валового регионального продукта (ВРП), индекса физического объема ВРП и индекса-дефлятора ВРП [2].

Валовой региональный продукт – это стоимость товаров и услуг, произведенных субъектом РФ для конечного использования.

Индекс физического объема ВРП отражает изменение физического объема товаров и услуг в отчетном периоде по сравнению с предыдущим периодом.

Индекс-дефлятор характеризует изменение цен на товары и услуги в отчетном периоде по сравнению с ценами на товары и услуги предыдущего периода.

Ранее ВРП вычислялся без разделения индексов физического объема ВРП и индекса-дефлятора по отраслям по следующей формуле [3]:

$$VRP_N = \frac{VRP_{N-1} \times IFO\_VRP_N \times INF\_VRP_N}{10000},$$

где

VRP_N - объем ВРП в текущих ценах в момент N, тыс. рублей;

VRP_{N-1} - объем ВРП в текущих ценах в момент (N-1), тыс. рублей;

IFO_VRP_N - индекс физического объема ВРП в момент N, % к (N-1);

INF_VRP_N - индекс-дефлятор объема ВРП в момент N, % к (N-1).

Теперь же для осуществления прогноза выпуска товаров и услуг рекомендуется использовать прогнозные значения индексов физического объема и индексов - дефляторов по видам экономической деятельности на уровне разделов общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД) [2].

Выпуск товаров и услуг в текущих ценах за год N-1 рекомендуется определять по следующей формуле:

$$V_{N-1} = \frac{\sum_i V^i_{N-2} \times IFO\_V^i_{N-1} \times \mathrm{ID\_V}^i_{N-1}}{1 - \mathrm{d}_{N-2}},$$

где:

V_{N-1} - совокупный выпуск товаров и услуг в текущих ценах за год *N-1*, тыс. рублей;
V^i_{N-2} - выпуск товаров и услуг в текущих ценах по *i*-му виду экономической деятельности за год *N-2*, тыс. рублей;
$IFO\_V^i_{N-1}$ - индекс физического объема выпуска товаров и услуг по *i*-му виду экономической деятельности за год *N-1*, в % к предыдущему году (*N-2*);
$ID\_V^i_{N-1}$ - индекс-дефлятор выпуска товаров и услуг по *i*-му виду экономической деятельности за год *N-1*, в % к предыдущему году (*N-2*);
d_{N-2} - доля неучтенных видов экономической деятельности на уровне разделов ОКВЭД, принимается по данным последнего отчетного года (*N-2*).

ВРП в текущих ценах за год (*N-1)* рекомендуется вычислять по формуле:

$$VRP_{N-1} = V_{N-1} \times (1 - \mathrm{k}),$$

где:
VRP_{N-1} - ВРП в текущих ценах за год *N-1*, тыс. рублей;
k - доля промежуточного потребления в текущих ценах в выпуске товаров и услуг в текущих ценах за год *N-2*, в %.

Выпуск товаров и услуг в ценах предыдущего года за год *N-1* теперь определяется по формуле:

$$V^p_{N-1} = \frac{\sum_i V^i_{N-2} \times IFO\_V^i_{N-1}}{1 - \mathrm{d}_{N-2}}.$$

Тогда объем ВРП в ценах предыдущего года за год *N-1* определяется по формуле:

$$VRP^p_{N-1} = V^p_{N-1} \times (1 - \mathrm{k}).$$

Индекс физического объема валового регионального продукта за год *N-1* вычисляется по формуле:

$$IFO\_VRP_{N-1} = \frac{VRP^p_{N-1}}{VRP_{N-2}}.$$

Индекс-дефлятор валового регионального продукта за год *N-1* равен:

$$ID\_VRP_{N-1} = \frac{VRP_{N-1}}{VRP_{N-2} \times IFO\_VRP_{N-1}}.$$

Для учета взаимосвязи сценарных условий с прогнозными показателями и взаимодействия между расчетными показателями необходимо применять многофакторный анализ.

В качестве независимых переменных нужно использовать сценарные условия для достижения целевых показателей такие как: мировые цены на нефть марки "Urals", цены на природный газ, среднегодовой курс доллара США к рублю, прогноз инфляции, государственные капитальные вложения, объем ВРП на душу населения, среднегодовая численность населения и др.

В качестве зависимых переменных эконометрической модели принимаются рассчитываемые прогнозные показатели: ВРП, индекс физического объема ВРП, объем инвестиций в основной капитал, объем продукции сельского хозяйства, оборот розничной торговли, индекс промышленного производства и др.

Например, для прогноза объема ВРП VRP_N в период *N* в качестве факторов модели линейной регрессии можно использовать сценарное значение объема ВРП на душу населения VRP_DN_N или выпуск товаров и услуг VTU_N в момент N:

$$VRP_N = a_0 + a_1 \times VRP\_DN_N \text{ или } VRP_N = a_0 + a_1 \times VTU_N.$$

На изменение физических объемов ВРП влияют такие факторы, как изменение денежных доходов населения, прибыли, доходов регионального бюджета, поэтому многофакторная модель линейной регрессии для прогноза индекса физического объема ВРП может быть представлена в виде:

$$IFO\_VRP_N = a_1 \times \frac{PIN_N}{PIN_{N-1}} + a_2 \times \frac{PR\_ALL_N}{PR\_ALL_{N-1}} + a_3 \frac{BUD\_ALL_{N-1}}{BUD\_ALL_{N-2}},$$

где

IFO_VRP_N - индекс физического объема ВРП в момент *N*, % к (*N-1*),

PIN_N, PIN_{N-1} - денежные доходы населения в периоды *N* и (*N-1*), млн. руб.,

PR_ALL_N, PR_ALL_{N-1} - прибыль прибыльных предприятий в периоды *N* и (*N-1*), млн. руб.,

BUD_ALL_{N-1}, BUD_ALL_{N-2} - доходы консолидированных бюджетов субъектов РФ в периоды (*N-1*) и (*N-2*), млн. руб.

После вычисления коэффициентов регрессии требуется оценить их значимость и адекватность модели.

На практике перечень факторов, влияющих на прогнозируемые параметры в каждом конкретном регионе должны определять эксперты, используя, в том числе, аппарат факторного и регрессионного анализа.

Выводы

Для повышения качества подготовки прогнозов регионами Минэкономразвития РФ должен инициировать разработку и внедрение на территории всех субъектов РФ единого информационно-аналитического комплекса, разработанного силами коммерческих структур и научно-исследовательских институтов, профессионально занимающихся прогнозированием.

Для учета взаимосвязи между прогнозируемыми социально-экономическими показателями разработанный программный продукт должен позволять гибко перестраивать систему связей.

Для выполнения прогнозов не только в теории, но и на практике необходимо использовать эконометрические модели, в том числе многофакторный регрессионный анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный Закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ "О стратегическом планировании в Российской Федерации".

2. Приказ Минэкономразвития России от 13 марта 2019 г. № 124 «Об утверждении рекомендуемой формы по основным показателям, представляемым органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации в Минэкономразвития России для разработки прогноза социально-экономического развития Российской Федерации на среднесрочный период, и методических рекомендаций по разработке, корректировке, мониторингу среднесрочных прогнозов социально-экономического развития субъектов Российской Федерации».

3. Приказ Минэкономразвития России от 30 июня 2016 г. № 243 «Об утверждении Методических рекомендаций по разработке, корректировке, мониторингу среднесрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации».

4. Придворова Е. С. Сравнительный анализ методов прогнозирования социально-экономического развития региона (на примере Белгородской области) // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2016. №1-1 (144).

5. Мищенко В.В., Кукарская Л.И. Проблемы прогнозирования социально-экономического развития в региональной политике Российской Федерации // Региональная экономика: теория и практика. 2017. №23.

6. Официальный сайт компании «Прогноз». URL: www.prognoz.ru/ products/ government/regional (дата обращения: 12.07.2019).

7. Битюцкая Н.И., Ситников А.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа «2П Прогноз»» № 2014618712 от 28.08.2014.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-552-557

Вартумян Арушан Арушанович

Северо-Кавказский федеральный университет

ГЕОПОЛИТИКА ТРАНСПОРТНЫХ АРТЕРИЙ НА ЮГЕ РОССИИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ПОЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Аннотация: *Глобальные магистрали, такие как проект «Север-Юг», - это социально-экономическое явление, во многом формируемое политической волей нескольких государств, которые и стимулируют организацию выбранных направлений в рамках своего понимания общих интересов. Рождение идеи МТК «Север-Юг» в недрах российского правительства рубежа 2000-х гг. сочетало следующие мотивы: попытка заработать на потоке китайских товаров в Европу путем перевода части трансевразийского океанского транзита на континентальную платформу через Иран, страны Каспия и на юг России; попытка придать импульс российским регионам Центра, Поволжья и Прикаспия за счет связных производств и роста услуг вдоль МТК; и, конечно, попытка обогатить российско-европейские отношения новой интересной инициативой, реально показывающей возможности России и сопредельных государств как связующей арки между Азией и Европой.*

Ключевые слова: *транспортные артерии, Юг России, геополитика, транспортная инфраструктура, транспортные коммуникации.*

Annotation: *Global highways, such as the North-South project, are a socio-economic phenomenon, largely formed by free volunteers of several states, which stimulate the selection of common interests necessary for their understanding. The birth of the idea of the North-South ITC in the depths of the Russian government at the turn of the 2000s. combines the following motives: an attempt to make money on the flow of Chinese goods in Europe by moving to cross-border transit routes through Iran, the countries of the Caspian Sea and southern Russia; an attempt to give impetus to the Russian region of the Central, Volga and Caspian regions through linking production and growth of services along the MTC; and, of course, an attempt to enrich Russian-European relations with an interesting new initiative, which really shows the possibilities of Russia and neighboring countries.*

Keywords: *transport arteries, South of Russia, geopolitics, transport infrastructure, transport communications.*

Современная трансрегиональная транспортная инфраструктура – сочетание множества интересов: это десятки крупных участников международной торговли, обслуживающих множество мелких, сотни операторов логистики, ответственных за разные участки. Здесь неважно, говорим мы об автомагистралях, железных дорогах, морских коммуникациях или авиасообщении. Процесс взаимообусловленный: первоначальное развитие транспортной артерии происходит в расчете на увеличение потока движения товаров, а последующие инвестиции в расширение канала и улучшение логистики идут уже по следам обозначенного интереса. Поэтому до появления удобной для бизнеса инфраструктуры ждать масштабного импульса не приходится. Это очень хорошо видно по изменениям стратегических оценок МТК СЮ, заметно снизивших к 2010-м гг. возможно пропускную способность транзита до 15-20 млн. тон в год, а стартовые – до 5 млн.

В условиях дефицита инвестиционных ресурсов и ограниченной грузовой базы лучшие результаты достигаются при координации и совместной деятельности соседних стран в рамках интеграционных проектов. В связи с этим увеличение связанности национальных транспортных коммуникаций оказалось, пожалуй, единственным направлением в развитии транспорта и логистики. В концентрированном виде эта связанность проявляется в развитии не столько

международных коридоров, сколько региональных связок, которые, в качестве отдельных звеньев, составляют национальные коммуникации. В свою очередь, их формирование влияет на ход региональной экономической интеграции, порой даже формируя ее.

МТК «Север-Юг» сегодня – это мозаичная транспортно-экономическая реальность, формируемая разной степенью готовности инфраструктуры и широким комплексом политических отношений России и стран-партнеров. Не будет сильным преувеличением сказать, что «Север-Юг» становится проекцией взаимных интересов РФ и ее партнеров друг на друга. Связная транспортная инфраструктура создается на десятилетия. Поэтому с точки зрения Москвы, МТК СЮ – это перспективный в будущем макроэкономический узел, завязанный на множество сопряженных систем: обрабатывающая промышленность, электроэнергетика, связь, туризм.

Ключевым субъектом наполнения «Север-Юг» в плане правовых и технических условий сопряжения коммуникаций является Евразийский экономический союз (ЕАЭС). Дополнительное содержание коридору на своих участках привносят страны зоны свободной торговли (ЗСТ) Союза независимых государств (СНГ) – Азербайджан, Узбекистан – с выходом а Турцию через Южный Кавказ: взаимодействие на Каспии в формате «пятерки» создает композицию морского участка и сухопутных проектов вдоль западного и восточного побережья. Затем на территории Ирана мы можем говорить о разделении МТК на два генеральных стержня – с выходом на Оман (страны Персидского залива) и Индию. Дополнительный кавказский фрагмент проекта «Север-Юг» определяется проблемами постсоветских конфликтов. Наконец, ключевой фактор экономической энергии МТК СЮ – два стартовых полюса: отношения ЕС с Россией и России – с Индией.

Основные преимущества проекта «Север-Юг» перед другими маршрутами и, прежде всего, перед традиционным морским маршрутом через Суэцкий канал, заключаются в сокращении времени перевозок (на 10 дней по отдельным корреспонденциям), а также в повышении экономической эффективности транскаспийского мультимодального маршрута, который в настоящее время снижается необходимостью неоднократной перевалки грузов.

На направлении МТК СЮ в период до 2025г. предусматривается реализация следующих основных мероприятий в районах действия пяти из 16 железных дорог РФ:

– Организация скоростного движения пассажирских поездов на участке Санкт-Петербург-Бусловская;

– Мероприятия по комплексной реконструкции участка Северо-Западной дороги: Мга-Гатчина-Веймарн-Ивангород и железнодорожных подходов к портам на южном берегу Финского залива;

– Развитие Московского железнодорожного узла;

– Реконструкция с электрификацией участка Ртищево-Кочетовка, строительство обхода Саратовского железнодорожного узла, нового моста через Волгу, введение электрифицированного участка от Ртищево до Кочетовки;

– Комплексная реконструкция участка Ахтуба-Трубная-Верхний Баскунчак-Аксарайская. В частности, планируется сдать в 2019г. железнодорожный мост через реку Ахтубу и реконструировать пункт технического обслуживания локомотивов на станции Аксарайская.

В общей сложности на эти мероприятия должны быть затрачены 15-18 млрд. руб. с датой завершения в 2023г. [1]

– Морской фрагмент МТК СЮ и его прибрежные «стволы» формируются несколькими маршрутами.

– Транскаспийский маршрут – с использованием российских морских портов Астрахань, Оля, Махачкала и портов Ирана – Бендер-Энзели, Ноушехр и Амирабад.

– Западный маршрут – прямое железнодорожное сообщение через пограничные переходы Самур (Россия) – Ялама (Азербайджан) с дальнейшим выходом на железнодорожную сеть Ирана через пограничный переход Астара (Азербайджан) – Астара (Иран).

– Восточный маршрут – прямое железнодорожное сообщение через Казасхстан, Узбекистан и Туркменистан с выходом на железнодорожную сеть Ирана через пограничные переходы Серахс (Туркменистан) – Серахс (Иран) и Акяйла (Туркменистан) – Инче Бурун (Индия).

По оценкам РЖД, большое значение для развития МТК СЮ в среднесрочной перспективе будут иметь сроки ввода в эксплуатацию новой железнодорожной линии Решт-Астара (Иран) – Астара (Азербайджан), которая является последним недостающим звеном железнодорожного маршрута по западной ветви МТК «Север-Юг».

Трехстороннее соглашение о строительстве железной дороги Астана-Решт-Казвин, которая должна соединить действующие стальные магистрали Азербайджана, Ирана и России, на уровне президентов было подписано еще в 2005г. Оно предусматривало прокладку сегментов железной дороги на территории Ирана протяженностью около 350км и Азербайджана – между Астарой и азербайджано-иранской границей – протяженностью 8,5км, а также реконструкцию уже существующей магистрали на территории Азербайджана. В течение десяти лет Иран достроил участок внутри страны Казвин – Решт. 6 марта 2019г. в провинции Гилян открылась железная дорога Казвин – Решт, которая является частью МТК «Север-Юг», фрагмента Казвин-Астара. Новая магистраль состоит из 53 туннелей протяженностью 22км. Здесь же построен самый длинный в Иране железнодорожный мост протяженностью 1430м, а также плотина Манджил. В итоге Казвин соеденен железнодорожным сообщением с Тегераном, а также с иранскими портами Бендер-Аббас в Персидском заливе и Амирабад на Каспийском побережье.

Очевидно, что безопасность и политическая стабильность государств-участников МТК СЮ зависят от инфраструктурной связности их регионов. Однако географическая и инфраструктурная связность еще не означает «совместимость». Необходима институционально-договорная база (в рамках одного или нескольких сопряженных интеграционных проектов, к примеру: ЕАЭС, Шанхайская организация сотрудничества (ШОС), участники из группы АСЕАН), а также общественно-политические условия для реализации эффективного сотрудничества. Другими словами, совместимость определяется не только физическим наличием коммуникаций (например, дорог, логистических центров и т.д.), но и возможностями для различных субъектов свободно пользоваться этой инфраструктурой. Требуется проработка вопроса – насколько особенности национальных законодательств и положения межгосударственных договоров делают возможным беспрепятственное движение товаров, услуг, капиталов и рабочей силы через границы и между различными интеграционными объединениями. Насколько это выгодно различным уровням бизнеса.

Для решения этой задачи с точки зрения интересов развития МТК СЮ необходимо проводить осознанную политику интеграции региона в рамках стратегии гибких партнерств по нескольким линиям. Во-первых, это создание постоянного института (механизма) межрегионального взаимодействия в гибком формате, близком «Азиатскому диалогу». Для формирования такого органа первоначально могли бы быть использованы возможности четырех стран – Ирана, России, Китая и Индии – как основных учредителей для проведения дискуссий по экономическим, политическим, культурным вопросам и вопросам безопасности. Эти переговоры могут быть организованы на двух уровнях – экспертов/ученых и чиновников министерств. Постоянный формат работы такой структуры должен повысить интерес к нему других азиатских стран.

Следует также учитывать, что для планирования и осуществления проекта МТК СЮ очень важен футуристический подход во всех секторах. Необходимо на базе межведомственных структур, занимающихся сейчас диалогом по МТК, создавать специализированные совместные комитеты для разработки сценариев и планирования на краткосрочный (до 2025г.), среднесрочный (до 2035г.) и долгосрочный (до 2050г.) периоды, что станет весьма эффективным средством содействия сотрудничеству. Необходимо проанализировать в среднесрочной перспективе, как новые совместные проекты могли бы развиваться вдоль сегментов МТК СЮ в

сфере полимерной химии, машиностроения, станкостроения, автопрома, авиапромышленности, приборостроения, создания новых полимерных и композитных материалов.

Во-вторых, это создание общего валютного рынка. Обычно это достаточно высокая степень интеграции, мало достижимая на практике. Однако, создание валютных союзов в плоскости ухода от взаимной торговли в долларах США – одна из постоянно обсуждаемых тем в формате ЕАЭС, ШОС и «Исламской восьмерки» (D-8; так называемая восьмерка наиболее развитых стран исламского мира, учрежденная в рамках Организации исламского сотрудничества в 1997г.).

В-третьих, установление единых условий бизнеса и торговли. Содействие взаимному экспорту уровня среднего и малого бизнеса (инфраструктурными банками, национальными экспортными агентствами, другими институтами) – один из способов обустройства региональной интеграции.

В-четвертых, это развитие туризма и безвизового перемещения – основные формы поддержки создания общего рынка труда. Россия стремится привлекать в свою экономику активных людей из сопредельных государств, как в статусе новых граждан РФ, так и трудовых мигрантов. Либерализация миграционной политики и смягчение процедур оформления гражданства, по прогнозам, должна увеличить численность населения страны на 5 млн. человек. МТК СЮ проходит как раз через регион, наиболее емкий с точки зрения трудовых ресурсов [2].

Именно эта тема является одним из основных моментов приложения сил для России, Индии, Ирана, Белоруссии. В Евразии растет рынок решений для промышленного интернета вещей и искусственного интеллекта. По данным Росстата, доля экспорта цифровых товаров и услуг в ВВП России в 2018г. выросла с 0,5% до 1% (для КНР эта цифра – 5,8%, для стран ЕС – 2,5%). Другой ряд проектов в этом сегменте – создание фармакологических кластеров-производств и реабилитационных клиник: в Индии, Иране, Азербайджане, России.

В период одновременного протекания торговых войн и процессов интеграции на одних и тех же участках социально-экономического пространства. Это создает особые вызовы и возможности для проекта МТК «Север-Юг» в ближайшее десятилетие.

– Цифровизация деятельности. Оцифрованы не только бизнес, но и вся жизнь общества. Возникновение самообучающихся систем в логистике и на транспорте – почти сегодняшний день. Благодаря этому экономика может вырасти на $16 трлн. к 2030г. 200 из 500 крупнейших компаний исчезнут или объединятся.

– Энергетическая революция. К 2017г. в 13 раз выросло использование возобновляемых источников энергии. Широкое применение электромобилей изменит стратегию применения ресурсов – они перестают быть источником сверхдоходов. МТК СЮ сокращает один из источников наполнения своего транзита.

– Быстрый рост населения планеты. Увеличение продолжительности жизни за 30 лет от 48 до 71 года. Индустрия долголетия стала важнейшей частью экономики – это здравоохранение, индустрия «здорового питания» и образа жизни. Чтобы накормить будущие 10 млрд. населения, надо производить на 60% больше еды. Агропромышленный комплекс должен стать высокотехнологичной отраслью с удвоением производительности.

– Урбанизация. Рост агломераций на Каспии и вдоль МТК СЮ. Численность Баку уже превышает 2 млн. человек. Идет развитие городов-миллионников в Казахстане: Алма-Аты, Нур-Султан, Чимкент. На этом фоне будет повышаться социально-экономическая обстановка и переизбыток рабочей силы на рынке труда.

– Трансформация рынка труда. Роботизация постепенно замещает физический труд. Теперь важна не дешевизна рабочей силы, а квалификация сотрудников. Происходит обратный перенос производства в развитые страны из развивающихся, а значит, реформирование системы образования. Наблюдается переход от практики передачи знаний к умению находить информацию, к развитию навыков креативного мышления. Это напрямую касается

взаимодействия участников МТК СЮ в сфере высшего и профессионально-технического образования.

Используя модель соседства, евразийского партнерства (ЗСТ ЕАЭС), развитие различных симбиотических двусторонних и многосторонних связей в экономике, Россия обеспечивает себе «подушку» устойчивости из ряда относительно стабильных союзников/партнеров. Прогноз Международного валютного фонда по росту ВВП в реальном выражении для России на 2019г. – 1,8%, для Индии – 7,5%, Ирана – 3,6%, Казахстана – 3,1%, Узбекистана – 5%, Белоруссии – 3,1%, Азербайджана – 3,6%, Армении – 4,8%, Грузии – 4,8%. По оценкам Института экономики РАН, в случае реализации сценариев совместных промышленно-торговых цепочек может произойти ускоренный потенциальный рост России к 2028г. – дополнительно на 3% ВВП [3].

Таковы преимущества и сложности квазиинтеграционного проекта, в рамках которого МТК «Север-Юг» может осуществить стержневое наполнение.

Какую мы видим региональную составляющую для коридора «Север-Юг» применительно к Астраханской области?

Наличие надежных транспортных коридоров является, несомненно, главной темой для политиков, экономистов, аналитиков, специалистов по логистике. Увеличивающаяся экспортная составляющая развитых экономик, рост ВВП новых лидеров (Китай, Индия, Пакистан), усиление экспортных возможностей России (разновекторное), реформирование международной системы отношений повлияли на характер международных транспортных коридоров. После распада Советского Союза происходила «локальная геополитическая революция», при которой бывшие страны СССР либо стали «жертвами» своего транзитного положения (Эстония, Латвия, Литва, Украина), либо получили статус перспективных логистических территорий (Грузия, Азербайджан, Казахстан, Узбекистан, Туркмения, Белоруссия). Россия разрабатывает собственные инфраструктурные проекты, вступая в геополитическое и экономическое соперничество с Китаем, Индией, Турцией, Ираном и другими странами. Но помимо транспортной составляющей для локальных транспортных коридоров необходимо учитывать весь комплекс потенциальных сценарных вариантов.

Китай. Мега-проект «Один пояс – один путь» является продуманной, финансируемой, политически поддержанной программой «китайской транспортной экспансии».

Индия. Все локальные транспортные коридоры для третьей экономики мира – борьба за новые рынки. В данном случае регион «Центральная Азия», где интересы Китая, России и Индии сходятся в борьбе за контроль над регионом и преимущество пока остается за Китаем.

Иран. Региональная держава с огромным потенциалом, «зажатая» санкциями, но требующая «места под солнцем». Активные игроки транспортных проектов (Пакистан, Япония, Корея) имеют свои интересы и в зависимости от конъюнктуры рынка ведут замысловатую стратегию сдерживания китайских проектов.

Внутрироссийская сторона проблемы, на наш взгляд, имеет, в том числе, внутриполитическую и внутриэкономическую проекцию:

– Ощущается нехватка «свободных» инвестиционных средств. Альтернатива – привлечение и использование государственно-частного партнерства в реализации «каспийского участка» МТК «Север-Юг»;

– Создание специального инвестиционного «Каспийского фонда», банка «Каспийского участия» в реализации проекта;

По примеру создания федеральных университетов – создание Каспийского федерального университета (в г. Астрахань) с образовательной и научной направленностью, обеспечивающей потребность в реализации МТК:

лингвистика (потребуются тысячи дипломированных специалистов со знанием азербайджанского, персидского, туркменского, казахского языков);

подготовка инженерных кадров (транспортников геологов, мостостроителей, «тунельщиков», ихтиологов и т.д.);

расширение логистических и инфраструктурных проектов на Каспийском побережье (Каспийск, Махачкала);

Региональный (Астраханский аспект проблемы):

– проведение в Астрахани ежегодных форумов молодежи «Каспий», по примеру Кавказского форума «Машук», с целью формирования и принадлежности к «каспийской идентичности»;

– социокультурная составляющая проекта не менее важная, чем политическая или экономическая. Широкое участие молодежи в спортивных, фольклорных, коммуникационных мероприятиях создаст необходимую атмосферу «единства идей и целей» в реализации проекта;

– с российской стороны повышение статусной роли Астрахани как центра формирования локальной «столичной» идентичности;

– повышение транспортной универсалии Астрахани как «транзитной оси» - «Север-Юг»;

– «Запад-Восток». В перспективе строительство железной дороги Астрахань-Элиста, Элиста-Ставрополь;

– Широкое участие в проекте (наполняемость рынка) представителей малого и среднего бизнеса, создание в Астрахани центра по льготному кредитованию фермерских и бизнес-структур, с последующей трансформацией методик обучения в Калмыкию и Дагестан;

– создание в Астрахани судостроительного кластера с государственными заказами (туристические, транспортные, контейнерские, ремонтные, рыболовные и т.д.);

– организовать целенаправленную PR-кампанию по продвижению бренда Т «Север-Юг», с привлечением возможностей телевидения, СМИ, блогерского участия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад Межд.дискус.клуба «Валдай»: Международный транспортный коридор «Север-Юг» и сценарии трансрегиональной интеграции (июнь 2019г.). – М., 2019. – с. 14-19.

2. Вартумян А.А. География транспорта: взаимосвязь экономики, политики и туризма//Мат.межд.науч-прак.конф. «Синергия гостеприимства: возможности, проблемы и перспективы» (25-26 апреля, 2019г.). – Пятигорск, 2019. – с. 49-53.

3. Вартумян А.А. Политическая географии Северо-Кавказского региона: теоретические и методологические проблемы//Мат. XIII Межд.науч.-прак.конф. «Туризм и рекреация: фундаментальное и прикладное исследование» (25-26 апреля, 2017г.). – М., МГУ. – с. 257-262.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-558-567

Чудин Анатолий Андреевич

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

ПАРАДИГМА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РОССИИ И МИРА НА ОСНОВЕ ЦЕЛОСТНОГО ГЕОТРИОННОГО СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Аннотация. *Разработан целостный подход (два других его названия геотрионика и метатехнология) позволяющий разработать парадигму устойчивого будущего развития человека и человеческого общества, обретая в процессе этого развития необходимые дополнительные ресурсы и перераспределяя их по возможности на справедливой основе между слоями общества, а также между человеком и природой.*

Ключевые слова: *парадигма, геотрион, синергетический эффект, устойчивое развитие.режим со – содействия.*

Annotation. *Developed a holistic approach (the two other titles geotronic and metatekhnologiya) to develop the paradigm of a sustainable future of human development and human society, acquiring in the process of development requires additional resources and redistributing them in a fair manner between layer-s of the society, and between man and nature.*

Keywords: *paradigm, geotrion, synergistic effect, sustainable development. co – promotion mode.*

Цель и постановка задачи.

Мир стремительно развивается. Возникает острый вопрос, куда, то есть в позитивном направлении или к своей гибели. Поскольку современное человеческое общество названо обществом риска, способным погубить себя посредством некоторой вселенской катастрофы: социального, техногенного или экологического характера. Цель работы заключается в попытке ответить на более сложный вопрос, не только куда, но как могут и должны развиваться Россия и земной мир, чтобы перейти от современного состояния общества риска к будущему состоянию гармоничного общества. С тем, чтобы устойчиво развиваться, обеспечивая себя необходимыми ресурсами в условиях нелинейных изменений условий развития, справедливо перераспределяя их между слоями общества, а также между человеком и природой.

Используемые термины. Под целостным подходом будем понимать совокупность: мировоззрений, наук и технологий, отражающих представления, знания и умения современного человеческого общества. Под геотрионами будем понимать фундаментальные объекты земного мира, состоящие из: населения, хозяйства и территории (природы). Геотрионы также являются субъектами мировой истории, действующими на основе выбора своей свободной коллективной воли[1]. Геотрион человечества или геотрион меньшего масштаба, например, отдельной страны земного мира можно отождествить с современным человечеством, состоящим из трех общностей: социальной, экономической и экологической. Каждый человек отражает в себе свойства указанных общностей. Под парадигмой развития человечества будем понимать совокупность научных методов управления, а также целей, способов, сил, механизмов, технологий, критериев развития, отражающих собой эволюцию человека и человеческого общества в процессе своего исторического развития. Под устойчивым развитием геотриона человечества будем понимать способность наращивать свои возможности и потребности в условиях угроз и вызовов и катастроф.

В работе [2] проведено исследование ряда ключевых научных концепций (парадигм) эволюции развития человека и общества. В каждой из указанных концепций выделены и

отражены лишь некоторые аспекты или направления развития человеческой цивилизации, оговаривая при этом, что эти направления ныне находятся в стадии начального формирования и поэтому пока не наполнены необходимой конкретикой. В данной работе делается попытка разработать и предложить для обсуждения такую парадигму развития человеческой цивилизации, элементы которой охватывали бы основные выявленные в работе [2] аспекты будущего развития человеческой цивилизации и при этом были бы наполнены необходимой для понимания конкретикой. Для этого в данной работе кратко описаны основные элементы парадигмы развития, разработанной российскими учеными, в том числе: цели, силы, способы, управленческие механизмы – технологии, критерии развития, которые дают возможность перейти человечеству от состояния общества риска к гармоничному обществу, устойчиво развивающемуся в условиях нелинейного развития человеческой истории.

Причина и укрупненная технология развития человечества. Предлагаемый здесь метод или подход проясняет причины и обобщенную технологию развития человечества. Имеется в виду причины и действия, осуществляемые в процессе своего развития геотрионами отдельных стран и всего человечества. Более того подход намечает направления дальнейшего развития указанных объектов исследования и одновременно субъектов мировой истории, развивающихся на основе выбора своей свободной воли. Ответим на вопрос, что служит причиной развития человечества. Человечество развивается на основе триад: «ситуация» - «оценка» - «реакция» с целью изменения ситуации, (как предполагается) в лучшую для людей сторону.

Удовлетворение потребностей людей возможго с помощью следующей укрупненной технологии развития. В разных регионах страны или мира возникают неравновесности. То есть где - то возникают хорошие условия, а в других - плохие. Между указанными потенциалами возникает напряженность, возникают процессы, сопровождаемые потоками ресурсов людей. Назовем эти процессы негативными или недостаточно позитивными, поскольку они порождаются неудовлетворенностями людей. Они возникают по причине того, что неудовлетворенные условиями жизни люди хотят улучшить для себя условия жизни и перемещают свои ресурсы из одного места в другой. Укрупненная (наиболее общая) технология развития человечества заключается в выполнении следующих действий. Управленцы геотриона отслеживают ситуацию и выявляют негативы, возникающие в геотрионе. Выявив негативные потоки ресурсов населения, они направляют их на полезную работу, объединяя посредством кооперации ресурсы этих потоков со своими ресурсами, создавая синергетический эффект. У людей появляется новое орудие труда и ситуация изменяется, причем часто непонятно в какую сторону в долговременной перспективе.

Источник развития человечества. Суть синергетического эффекта, используемого в разработанной парадигме. Существует мнение, что весь мир возник и человечество развивается посредством множества синергетических эффектов, то есть каскада синергий. Например, в результате объединения (то есть кооперации ресурсов населения и ресурсов управленцев региона) может возникнуть синергетический эффект. В этом случае у управленцев региона, а также у населения, приходящих в это место со своими ресурсами, посредством синергетического эффекта увеличиваются объемы ресурсов, которые затем перераспределяются между ними, а также между человеком и природой этого региона, по возможности, гармоничным образом. Таким образом, причина и суть геотрионного синергетического похода заключается в увеличении ресурсов у всех участников – создателей синергетического эффекта, а также их перераспределение с целью взаимного удовлетворения потребностей всех его участников. В результате этого в соответствующих регионах геотриона возрастают их возможности в виде дополнительного объема свободной энергии, который они могут свободно тратить для своего дальнейшего развития и удовлетворения своих потребностей. В результате создания синергетических эффектов в геотрионе образуются новые структуры, являющиеся

орудиями труда, посредством которых люди получают возможность постоянно увеличивать для себя объем ресурсов для своего дальнейшего развития [3].

Механизмы развития человечества. Управленческие механизмы – технологии, используемые в разработанной парадигме. В работе [4], посвященной геотрионному синергетическому подходу описаны семь базовых (интегральных) механизмов естественного развития геотриона. Другие названия указанных механизмов - это: виды, тенденции, направления естественного развития геотриона. А также управленческие механизмы – технологии, позволяющие управленцам геотриона целенаправленно корректировать указанные механизмы в нужную для людей сторону, создавая синергетические эффекты для общностей человечества. Перечислим указанные управленческие механизмы. Синергетичности, усложняемости, цикличности, конфликтности, нелинейности, востребованности, разнонаправленного развития в духовной сфере. Все они образуют собой механизм создания синергетического эффекта на регулярной основе, которые можно создавать в трех общностях геотриона. Напомним, в геотрионе человечества их три. Перечислим их: социальные общности, экономические общности и территориально экологические общности. Каждый человек отражает свойства указанных общностей. Механизм создания синергетических эффектов на регулярной основе, разработанный российскими учеными, позволяет людям увеличивать объем ресурсов в указанных общностях, по возможности справедливо перераспределяя ресурсы, между людьми и природой [5].

Условия, позволяющие создавать синергетические эффекты на регулярной основе. Обсуждаемый здесь механизм – технология, разработанный в работе [5], в свою очередь состоит из семи базовых управленческих механизмов – технологий. Перечислим их. Синергетичности, доверительности, востребованности, естественного развития, мотивации людей, создания обобщенного орудия труда, мягкого управления. Одновременное использование указанных управленческих механизмов – технологий позволяет организовать в геотрионе человечества режим со – содействия между следующими общностями геотриона. Перечислим их. Между управленцами и слоями общества, между слоями общества, между слоями общества и тенденциями в геотрионе.

Механизм синергетичности посредством кооперации структур геотриона создает синергетический эффект. Механизм доверительности создает режим доверия между структурами геотриона. Механизм востребованности создает режим со – содействия между создателями синергетического эффекта Механизм естественного развития позволяет целенаправленно корректировать тенденции развития в геотрионе, двигаясь как бы на волне тенденций. Механизм корректирования мотивации людей обеспечивает способность людей принимать решения на основе выбора своей свободной воли в соответствии со своими истинными потребностями, а не навязанными СМИ. Механизм обобщенного орудия труда побуждает негативные процессы в геотрионе выполнять полезную работу. Механизм мягкого управления делает то, что геотрион человечества посредством нового орудия труда изменяет свое состояние и направление своего развития, используя энергетику самого геотриона [3].

Цели, средства и критерии, используемые в разработанной парадигме. Начнем описание элементов указанной парадигмы с описания принципиально новых представлений о земном мире и о человечестве, которые в данной работе отождествляются друг с другом. Целью развития человечества, то есть земного мира или геотриона Земли, по нашему мнению, является построение гармоничного в широком смысле общества на планете. То есть цель парадигмы развития человечества – это гармонизация отношений между слоями общества, а также между человеком и природой. То есть организация между ними режима со – содействия, обобщенным выражением этого режима может служить термин взаимная забота друг о друге. То есть достижение состояния, противоположного состоянию, которое можно выразить термином рознь мира сего.

Средством достижения указанной цели является использование совокупности: мировоззрений, наук и технологий, в том числе механизм создания синергетических эффектов на регулярной основе, используя управленческие механизмы – технологии, являющиеся объективными закономерностями, отражающими устойчивые характеристики поведения человеческих общностей. Указанные закономерности позволяют людям целенаправленно корректировать направление результирующего вектора развития человечества [3].

На основе использования указанных управленческих механизмов – технологий на Земле может быть создана ноосфера. То есть целью парадигмы развития является создание сферы разума, объединяющего в единый организм силы человеческого общества, природы, и гармонично (согласованно) развивающегося в соответствии с законами и закономерностями, установленными во вселенной [6]. Критериями успеха достижения цели предлагаемой парадигмы являются максимизация в геотрионе объема свободной энергии и минимизация розни мира сего. Указанные здесь цель и критерии успеха вполне соответствуют, или, по меньшей мере, не противоречат прогнозам, которые даны выдающимися учеными последнего времени, изложенными в обзоре [2] научных концепций, посвященных парадигмам развития человека и человечества.

Главное противоречие развития современного человечества. Рассмотрим ключевые научные концепции эволюции развития человека и общества и попытаемся обозначить основы, определяющие современную парадигму. В работе [7] ЭлвинТоффлер определил этапы истории развития человечества как три волны. Первая волна непосредственно характеризуется произошедшей 10 тысяч лет назад аграрной цивилизацией. Вторая волна – промышленная революция, в результате которой сформировалось индустриальное общество (300 лет назад). Э. Тоффлер отмечает: «Единое хозяйство Первой волны было преобразовано в расщепленную экономику Второй волны. Индустриализм разрушил единство производства и потребления и отделил производителя от потребителя… На одном уровне индустриальная революция создала замечательно интегрированную социальную систему со своими особыми технология ми, со своими собственными социальными институтами и своими собственными информационными каналами, причем все они хорошо подогнаны друг к другу. Однако на другом уровне она разрушила лежащее в ее основе единство общества, создавая стиль жизни, полный экономической напряженности, социальных конфликтов и психологического нездоровья. И только если мы поймем, каким образом этот невидимый клин формировал нашу жизнь в эру Второй волны, мы сможем в полной мере оценить влияние Третьей волны, которая уже сегодня начинает переделывать нас по-своему… Возникающая цивилизация пишет для нас новые правила поведения и ведет нас за пределы стандартизации, синхронизации и централлизации… Она могла бы превратиться в первую – за весь известный нам период истории – истинную человеческую цивилизацию».

Геотрионный синергетический подход дает ответ на вопрос, каким образом этот невидимый клин формировал в нашу жизнь в эру Второй волны. По мнению авторов этого подхода, он породил в человечестве, так называемую, рознь мира сего. Поэтому целью Третьей волны, согласно разработанной в нем парадигме, будет, по нашему мнению, увеличение объема свободной энергии в человеческой цивилизации и одновременно уменьшение розни мира сего,

Основной фактор развития человечества. Таким фактором развития человечества ныне является научно технический прогресс (НТП). Даниел Бел в работе [8] вводит понятие «постиндустриальное общество» (postindustrialsociety) и характеризует трансформации, происходящие во второй половине XX в., как третью технологическую революцию, выделяя следующие новации лежащие в ее основе [8]: замена механических, электрических и электромеханических систем на электронные; миниатюризация элементов, открытие транзисторов, что сравнимо с открытием энергии пара; преобразование информации в цифровую форму; программное обеспечение, дающее возможность пользователю компьютера быстро решать разные задачи; фотоника – ключевая технология транспортировки в сверхчистом стекле

или оптическом волокне больших объемов цифровых данных посредством лазера. Д. Белл отметил, что постиндустриальное общество – это новый принцип социально-технологической организации и новый образ жизни, вытесняющий индустриальную систему... Это общество, основанное на услугах, и прежде всего услугах образования, здравоохранения, анализа и планирования, программирования и т.п. Это начало вступления в информационную эру: новая информационная эра базируется не на механической технике, а на «интеллектуальной технологии», что позволяет говорить о новом принципе общественной организации и социальных перемен. Это ставит во главу угла теоретическое знание в качестве источника обновления и изменяет природу технического прогресса.

Целостный подход (геотрионика, метатехнология) дает дальнейшее развитие указанных тенденций, предлагая в качестве этого технологии глобального действия [9]. Они позволяют уменьшить влияние факторов физического труда и капитала и увеличить влияние факторов НТП, прежде всего факторов умственного труда. В социальной сфере предлагается целостный подход, то есть геотрионика. В хозяйственной сфере (технике) предлагается искусственный интеллект, под которым подразумеваются робототехника, а также информационные управляющие системы (ИУС), построенные на базе особого рода нейрокомпьютинга, разработанного российскими учеными и не имеющего зарубежного аналога. К большому сожалению, эти работы в настоящее время прекращены в связи со смертью главного разработчика В.И. Бодякина. Однако, в случае возобновления финансирования указанных работ Россия и мир могли бы получить искусственный интеллект, который получил бы статус уже не машины, а развивающегося разумного организма, самостоятельно развивающегося и накапливающего свои способности по управлению различными предметными областями на основе постоянно возрастающих в нем возможностей, в том числе в области совершенствования выбора его свободной воли, воспитанной на человеческих духовно нравственных принципах. Причем эти информационные управляющие системы в обозримое время могут стать в рутинной сфере деятельности умнее человека, даже коллектива людей, поскольку они способны вместить в свою память знания и умения всех предыдущих поколений людей, содержащихся в библиотеках мира. В этом, по нашему мнению, ничего обидного для человека, ведь могут же предыдущие поколения людей быть умнее современного отдельного человека и посредством указанных ИУС обретают способность творить современную действительность и будущее человечества.

Технологический вектор развития человечества. Н.Д. Кондратьев определил роль научно-технических нововведений в циклическом, т.е. волнообразном, характере изменений. Исследователем была сформулирована первая систематизированная концепция долговременных колебаний в экономике, названных длинными волнами Кондратьева. Н.Д. Кондратьев показал, что в экономической динамике существуют волнообразные циклы, в которых периоды развития продолжительностью около 24 лет сменяются периодами спада в течение 23–35 лет. Им было обнаружено, что в «течение приблизительно двух десятилетий перед началом повышательной волны большого цикла наблюдается оживление в сфере технических изобретений. В начале и в период, предшествующий повышательной волне, наблюдается широкое применение этих изобретений в сфере промышленной практики» [10]. Н.Д. Кондратьев полагал, что лишь крупные изобретения оказывают определяющее влияние на весь ход экономической динамики, придавая ей циклический характер.

В геотрионном синергетическом подходе, помимо циклического характера развития человечества, выявлены еще дополнительно шесть видов, направлений, тенденций, точнее механизмов его естественного развития [4]. Причем они осуществляются одновременно в трех частях геотриона человечества, имеется в виду в трех общностях человечества, а именно в: социальной, экономической и территориально экологической общностях. Более того в геотрионике разработаны механизмы – технологии, позволяющие целенаправленно корректировать указанные механизмы естественного развития, обеспечивая рост свободной

энергии в геотрионе человечества. Имеется в виду наращивание в нем объема ресурсов и их перераспределение, по возможности, на сбалансированной основе между слоями общества, а также, между человеком и природой [5].

Социокультурный вектор развития человечества. Циклическую природу социальных и технологических изменений отмечал и Питирим Сорокин. Он один из первых обозначил путь трансформации индустриального общества и заложил основы теории инновации в социокультурной сфере. П.А. Сорокин выдвинул тезис, согласно которому в современном обществе происходит появление и постепенный рост компонентов нового социокультурного строя. В книге [11] отчетливо сформулирована перспектива трансформации в интегральное общество капиталистического и социалистического типов индустриального общества: «Лидеры Запада уверяют нас, что будущее принадлежит капиталистическому (“свободное предпринимательство”) типу общества и культуры. Напортив, лидеры коммунистических стран самоуверенно ожидают коммунистической победы в ближайшие десятилетия. В отличие от тех и других предсказаний, я склонен думать, что доминирующим типом возникающего общества и культуры не будет вероятно, ни капиталистический, ни коммунистический, а тип suigeneris, который мы обозначим как интегральный тип. Этот тип… должен включать в себя большинство позитивных ценностей и быть свободным от серьезных дефектов каждого типа… Он в конечном счете вырастет в единый интегральный социальный, культурный и личностный строй в человеческой вселенной» [11].

Разработчики целостного подхода (геотрионики, метатехнологии) вполне разделяют идеи П.А. Сорокина. С той лишь разницей, что достоинств социализма и капитализма недостаточно, чтобы устранить недостатки обоих путей развития. Поскольку оба пути занимаются перераспределением ресурсов в условиях их дефицита зачастую в ущерб природе. Вспомним изречение Мичурина: мы не можем ждать милостей от природы, взять их у нее наша задача. Острословы перефразировали вторую часть изречения: … после того, что мы с ней сделали. Геотрионный синергетический подход позволяет наращивать объем как материальных, так и нравственных ресурсов, справедливо перераспределяя их между слоями общества, а также между человеком и природой [3].

В качестве обоснования этого утверждения приведем здесь пример, чем в настоящее время являются деньги, которые используются ныне в качестве эквивалента при обмене продуктами и услугами. Современные деньги не могут считаться истинными эквивалентами и единицами измерения. Разве можно что - то измерять, если сами единицы измерения постоянно изменяют свое значение, например, из-за изменяемого курса валют. Более того изменение курса валют происходит на субъективной основе, то есть курсы валют управляются владельцами конвертируемых валют и изменяются в пользу одних и ущерб другим людям. Наконец, деньги являются просто вредными (в широком смысле понимания этого термина). Да, они приносят пользу владельцам денег, но их приобретение зачастую связано с нанесением ущерба природе. В геотрионном синергетическом подходе в качестве единиц измерения, используемых при обмене товарами и услугами, используется категория ресурсные деньги. Объем энергии, затраченной на производство товаров и услуг, может быть более объективным эквивалентом при указанном обмене, поскольку никакой товар и услуга не могут появиться без затрат энергетических ресурсов.

Ноосферный вектор развития человечества. Концепция Н.Н. Моисеева основывается на экологической, ноосферной характеристике. Н.Н. Моисеев исходит из того, что человечество на рубеже XXI подошло «…не только к перелому тысячелетий, но и к перелому цивилизаций, который требует от людей утверждения нового образа мыслей и новой структуры ценностей... Общество стоит на пороге катастрофы, требующей перестройки всех оснований планетарного бытия… Диалектика нашей жизни такова: из-за развития технических новшеств мы оказались на краю пропасти, но без них мы не сможем перекинуть мост в будущее и отойти от края пропасти... Техническое развитие абсолютно необходимо, но его недостаточно: иной должна

стать цивилизация, иным – духовный мир человека, его потребности, его ментальность... Человечество вступает в эпоху ноосферы, т.е. в тот период истории, когда биосфера и общество будут развиваться как единый организм, как кооперативная система, эволюция которой следует целенаправляемому началу, стремящемуся (но не гарантирующему) обеспечить гомеостаз... человека и биосферы» [6].

Целостный, геотрионный синергетический подход обеспечивает смычку интересов разных слоев общества, а также человека и природы. Он позволяет в будущем посредством каскада синергий объединять усилия людей с силами природы, например, с энергией синезеленых, которые формируют погоду в океанах и вообще климат на планете. Используя энергию микробов целенаправленно управлять процессами в почве, да и вообще в толще Земли.

Нравственный вектор развития человечества. Институт массовой неформальной истинной элиты человечества. Н.Н. Моисеев, как и многие ученые, обращает внимание на информационные технологии, вместе с тем отмечает, что стремительное развитие информационных технологий является одним из революционизирующих новшеств, но оно порождает и новые угрозы[6]. Информационное общество «…действительно оказывает революционизирующее влияние на общество, стремительно меняя условия нашей жизни... Человек обрел в нем могучее, но крайне опасное оружие, не менее могучее страшное по своим последствиям, чем атомная бомба» [6]. Меняется и планетарное соотношение сил: «Передовые позиции вскоре окажутся у тех государств, которые способны выдвигать и использовать новые научные и технические идеи, производить качественно новый и совершенный технический продукт, необходимый обществу. Глобальная информационная система может стать инструментом зомбирования миллиардов людей» [12]

В геотрионном синергетическим подходе, осознавая эту опасность, разработаны управленческие механизмы – технологии, позволяющие создать в России, да и в других странах Институт массовой неформальной элиты страны [13].Эта элита будет способна обеспечивать интересы всех слоев и профессий общества. Выявить, структурировать, консолидировать работу указанной элиты возможно на основе технологии организации коллективной интеллектуальной деятельности, осуществляя ее в социальных сетях ИНТЕРНЕТА. К главным особенностям и достоинствам указанных управленческих механизмов – технологий, используемых для создания истинной элиты можно отнести то, что она создается на основе использования объективных закономерностей, отражающих устойчивый характер поведения коллективов людей. Например, закономерность 80-20. Она свидетельствует, что в каждом обществе 20% людей является элитой, а остальные 80% элитой уже не являются. Однако, эта элита обычно истинной элитой не является. Представители этой элиты не хотят слышать друг друга, а обеспечивают интересы узких кланов людей. Если же применить закономерность 80-20 уже к самой элите, то можно выявить лучшую часть элиты, то есть суперэлиту, которая уже захочет и будет способна обеспечивать интересы людей на справедливой основе. Институт будущей истинной неформальной истинной национальной элиты предусматривает в социальных сетях ИНТЕРНЕТА постоянный мониторинг поведения людей, получивших статус истинной элиты. В случае же проявления ими дурных поступков, противоречащих указанному статусу, эти люди должны лишаться своего статуса. То есть будет организован режим самоочищения суперэлиты от негодных людей.

Информационный (интеллектуальный) вектор развития человечества. Н.Н. Моисеев рассматривает развитие современного общества в контексте общества основанного на Коллективном Разуме: «Лавинообразное развитие средств связи, накопления и обработки информации и компьютерных технологий создает совершенно новые возможности для развития Коллективного Разума... Вот почему информационным мне хочется называть такое общество, в котором Коллективный Разум... играет такую же роль в общественном организме, какую играет индивидуальный разум в организме человека, т.е. помогает всему обществу справляться с трудностями обеспечения его гомеостаза, сохранения его целостности вместе с биосферой» [6].

Этому должны способствовать выработка общепланетарной идеологии, экологизация образования, диалог религий, культур, цивилизаций, включение разума в механизмы рынка, предвидение будущего и отбор благоприятных сценариев развития, самоорганизация общества, противостоящего миру ТНК, сохранение разнообразия и достижение партнерства цивилизаций: только совместные, хорошо скоординированные действия различных цивилизаций, способные выработать универсалии во взаимоотношениях Природы и человека, дают надежду на благополучный исход наступающего экологического кризиса... Цивилизационные различия и цивилизационные разломы могут стать важнейшими факторами постиндустриальной эволюции и нестабильностей постиндустриального мира. Это отнюдь не предполагает растворения локальных цивилизаций в едином глобальном сверхобществе: «Логика взаимодействия цивилизаций, основанная не на их стандартизации, а на учете их различий – это очередная страница логики истории. И она отвечает логике Природы» [6].В данном ключе сформулированы и концепции будущего мира и путей восхождения к нему Современной школой русского циклизма, лидерами которой являются Ю.В. Яковец, С.Ю. Глазьев, Б.Н. Кузык и И.В. Бестужев-Лада [14]. Концепция школы основывается на циклично-генетических закономерностях динамики общества, а также цивилизационном подходе к прошлому, настоящему и будущему человечества, согласно которой это будет интегральное общество, синтезирующее эффективность капитализма и социальную направленность социализма – оно будет ближе к тому типу общественного строя, который часто называют «шведским социализмом».

В геотрионном синергетическом подходе предлагается отказаться от спора, какая монотеистическая религия истинная. Все они (православие, католицизм, мусульманство, иудаизм) являются отражением представлений, навыков и предпочтений людей, исповедующих указанные религии. То есть отражением уровня духовно нравственного развития различных слоев человеческого общества. Причем не только отказаться от противоборства, а перейти к сотрудничеству в борьбе против розни мира сего. Поскольку указанные монотеистические религии к этому призывают людей. А для сотрудничества с народами, исповедующими атеизм, который, по нашему мнению, также является своеобразной религией людей, то для них основой для сотрудничества предлагается использовать принципы пять выше,Перечислим их. Власть выше собственности. Служение выше владения. Справедливость выше закона. Общее выше частного. Духовное выше материального.

Эти ценности вполне могут входить в состав ценностей, как для Русской цивилизации, так, например, и для стран Юго Востока. Однако заметим, что «Ни любви, ни стыда, ни совести, ни воздержания от грехов в моральном кодексе строителей духовной Китайской и других цивилизаций нет». Хотя известно, «что первый хан Золотой Орды Менгу-Тимур начинал свои указы фразой: «Предвечного Бога силою, Высшей Троицы волею наше Менгу-Тимурево слово…» То есть в Орде Воля Неба была за православной Троицей. Поэтому к этим пяти ценностям в геотрионике предлагается добавить еще две: Милость выше справедливости. Любовь выше всего.

Выводы. В книге «Информационная эпоха: экономика, общество и культура» отмечается: « «Информационная эпоха: экономика, общество и культура» М. Кастельса[15] отмечает: Не существует ничего такого, что не может быть изменено сознательным целенаправленным социальным действием, снабженным информацией и поддержанным легитимностью. Если люди информированы, активны и общаются в масштабах всего мира; если бизнес принимает на себя свою социальную ответственность; если средства массовой информации становятся вестниками, а не вестью; если политические деятели противодействуют цинизму и восстанавливают веру в демократию; если культура реконструируется если мы утверждаем межпоколенческую солидарность, живя в гармонии с природой; если мы отправляемся в исследование нашего внутреннего «Я», установив мир между собой – если все это стало возможным благодаря нашим

информированным сознательным коллективным решениям, пока еще есть для этого время, может быть, тогда мы сможем, наконец, жить и давать жить другим, любить и быть любимыми».

В геотрионном синергетическом подходе разработаны основы будущего народовластия, которые, по нашему мнению, вполне соответствуют чаяниям большинства людей в России и мире. Эти основы заключаются в создании двух институтов. Имеется в виду Института истинной массовой неформальной суперэлиты совместно с Институтом построения дорожных карт для всех кластеров страны, а затем и планеты. Суть Института построения дорожных карт для разных кластеров планеты заключается в следующем. Покажем это на примере России. Для этого предлагается в нашей стране создать Общероссийское Творческое Движение, состоящее из представителей истинной национальной элиты. ОТД способно посредством управленческих механизмов – технологий геотрионного синергетического подхода инициировать в различных кластеров страны построение дорожных карт, постепенно объединяя свою дорожную карту с дорожными картами смежных кластеров. С тем, чтобы, в конце концов, построить общую карту страны. Под кластерами будем понимать все виды кластеров, начиная с дворовых коллективов людей, и кончая крупными научными учреждениями, региональными и федеральными органами власти. Для того, чтобы инициировать и организовать этот процесс ОТД будет необходимо использовать методы сетецентрического взаимодействия в социальных сетях ИНТЕРНЕТА. Конституция России и технология организации коллективной деятельности вполне позволяют реализовать указанный процесс. Управленческие механизмы – технологии позволяют создать в общем информационном пространстве выявление наиболее эффективных дорожных карт и размножение их в кластерах аналогичного уровня. Следует указать, что построение и реализация данного процесса предлагается осуществлять в тесном взаимодействии с официальной элитой страны. Окончательное решение остается за официальными органами власти, а предложения, исходящие от ОТД носят рекомендательный характер. Однако, в случае принятия и поддержки указанного процесса со стороны соответствующих законодательных актов, создание двух указанных Институтов в России свидетельствовал бы о появлении нового типа народовластия, пришедшего на смену современной демократии с ее весьма подмоченной репутации со стороны народных масс.

По нашему мнению, будучи один раз созданными указанные Институты уже не позволят хитрому, злоумышленному и зачастую неумному, (в широком смысле) неквалифицированному меньшинству далее несправедливо пользоваться плодами трудов честного, талантливого большинства. Порождая при этом многочисленные: неправды, несправедливости, неэффективности. Используя два указанных Института, человечество способно многое изменить в мире в лучшую для людей сторону. Необходимо будет радикально пересмотреть свои предпочтения, представления и навыки на многие, казалось бы, незыблемые вещи. Современное человечество больно. Его дух (идеалы общества), душа (предпочтения, например, в реальной политике) и тело (навыки, например.в экологической сфере) расстроены. Необходимо постепенно создавать (воспитывать) нового человека. Геотрионика намечает технологию такого воспитания.

Суть этой технологии заключается в закреплении путем многократного повторения выборов людей, сделанных на основе их свободной воли, на духовно нравственном уровне достигнутом ими. Возникает вопрос, успеет ли человечество это сделать. Технологическая мощь человечества вопиюще превосходит уровень его развития в духовно нравственной сфере. Пора действовать, постепенно изменяя результирующий вектор развития человечества в сторону кооперации, правды и справедливости. То есть посредством каскада синергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матрусов Н.Д, Чудин А.А. Основы целостного подхода к управлению региональными структурами население – хозяйство – территория» Электронный журнал Управление экономическими системами № 5 2013 г.

2. Герман М.В. Размышления о парадигме развития современного человека и общества Вестник Томского государственного университета № 354 2012

3. Чудин А.А, Гуляев С.В, Глуховенко Ю.М. Геотрионные управленческие механизмы – технологии для будущего развития России и мира Электронный научный журнал Управление экономическими системами № 4 2019 г.

4. Чудин А.А. Семь базовых направлений или тенденций развития земного мира (геотриона), а также базовые технологии для их корректирования Электронный научный журнал Управление экономическими системами № 9 2018 г.

5. Чудин А.А, Гуляев С.В, Глуховенко Ю.М. Метод управления геотрионом в рамках его компьютерной модели Электронный научный журнал Управление экономическими системами № 4 2019 г.

6. Моисеев Н.Н. Судьба цивилизации. Путь Разума. М.: МНЭПУ, 1998. 228 с.

7. Тоффлер Э. Третья волна. М. : АСТ, 1999. 784 с.

8. Белл Даниел. Грядущее постиндустриальное общество. Опыт социального прогнозирования. М. :Academia, 1999. 787 с.

9. Чудин А.А. О трех Российских базовых технологиях глобального действия / Материалы 10-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017, Москва). М.: ИПУ РАН, 2017. Т. 2. С. 306-309.

10. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры // Вопросы конъюнктуры. М.: Социздат, 1925. Т. 1, вып. 1.

11. Сорокин П.А. Социальная и культурная динамика / пер. с англ. М. :Астрель, 2006. 1176 с.

12. Гостев А.А. Глобальная психоманипуляция. М.: Изд-во Институт психологии РАН, 2017. 467с.

13. Чудин А.А, Гуляев С.В, Глуховенко Ю.М. Какая элита способна обустроить Россию на основе геотрионного синергетического подхода Электронный научный журнал Управление экономическими системами №6 2019 г.

14. Русский циклизм: новое видение прошлого и будущего. Lewiston Queenstown Lamenter : Edwin Mellon Press, 1999. 400 p.

15. Кастельс М. Информационная эпоха: экономика, общество и культура // Библиотека Гумер. Политология. URL: http://www.gumer.info/ bibliotek_Buks/Polit/kastel/09.php 11. Kelly K. New Rules for the New Economy.Ten Radical Strategies for Connected World.USA :Penguin, 1999. 192 p.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-568-577

Светлов Михаил Семенович (1), Львов Алексей Арленович (2), Кленов Дмитрий Викторович (2), Мищенко Дмитрий Алексеевич (2), Багаев Игорь Сергеевич (2), Светлова Марина Константиновна (2)

1. Институт проблем точной механики и управления РАН
2. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Аннотация. *Работа посвящена проблеме обеспечения требуемого уровня помехоустойчивости информационных каналов (ИК), представляющих собой совокупность каналов связи (КС) и кодеков — кодирующих устройств (КУ) и декодирующих устройств (ДКУ), — работающих в условиях изменяющихся неконтролируемых параметров и характеристик КС.*

Дана классификация ИК в зависимости от интенсивности помех в КС. Проведен анализ методов обеспечения помехоустойчивости ИК при различной интенсивности помех в КС.

С целью обеспечения желаемых показателей по достоверности приема рассматриваются варианты ИК с адаптивным динамическим управлением, функционирующие в условиях действия помех различной интенсивности.

Рассмотрена математическая модель ИК с адаптивным кодированием. Предложены критерии эффективности адаптивного управления по минимуму вероятности ложного приема, а при большой интенсивности помех — по минимуму вероятности защитного отказа.

В качестве примера рассмотрена структура ИК с адаптивным кодированием и устройством мониторинга радиоканала, обеспечивающим возможность динамического управления работой КУ канала передающего устройства ИК.

Ключевые слова: *информационный канал, канал связи, кодирование, декодирование, адаптация, мониторинг каналов, помехоустойчивость.*

Annotation. *The work is devoted to the problem of providing the required level of noise immunity of information channels (IC), which are a set of communication channels (CC) and codecs — coding devices (EC) and decoding devices (DC) — operating in a changing uncontrolled parameters and characteristics of the CC.*

The classification of IC depending on the intensity of noise in the CC is given. The analysis of methods of providing IC noise immunity at different noise intensity in CC is carried out.

In order to provide the desired indicators for the reliability of reception, the variants of IC with adaptive dynamic control functioning under the conditions of noise of different intensity are considered.

The IC mathematical model with adaptive coding is considered.

Efficiency criteria of adaptive control of IC as the minimum probability of a false reception and for IC with high noise intensity — as a minimum the probability of protective failure is proposed.

As an example, the structure of the IC with adaptive coding and radio channel monitoring device, which provides the ability to dynamically control the operation of the channel EC of the IC transmitting device.

Keywords: *information channel, communication channel, coding, decoding, adaptation, channel monitoring, noise immunity.*

1. Введение.

Современные цифровые системы передачи информации (ЦСПИ), включая сетевые структуры, характеризуются наличием в них протяженных и распределенных в общем случае в

пространстве каналов связи (КС), как правило, функционирующих в различных неконтролируемых условиях. В первую очередь, это касается изменяющихся помеховых условий, определяющих специфику типа помех и их статистику в КС [1, 2]. В этом смысле, КС могут рассматриваться как нестационарные структуры, что необходимо учитывать при синтезе ЦСПИ, в частности при синтезе неотъемлемой и, по сути, главной части структуры любой ЦСПИ, каковой является информационный канал (ИК) как совокупность КС и кодеков — устройств кодирования (КУ) и декодирования (ДКУ). Основная цель функционирования ИК — точная и качественная передача информации заданного объема с требуемой скоростью при обеспечении максимально возможной достоверности приема в условиях канальных ограничений и неконтролируемых воздействий, в особенности помех, со стороны КС [3. 4].

При синтезе таких ИК с целью их оптимизации предложены варианты адаптивного управления ИК, позволяющие обеспечить наилучшие показатели по достоверности приема информации для различных состояний КС [5]. Проблема адаптации ИК к изменяющимся условиям внешней и внутренней сред функционирования ИК до сих пор остается весьма актуальной, не решенной в целом и требующей дальнейших исследований. В настоящей работе рассматриваются некоторые аспекты синтеза ИК с адаптивным динамическим управлением.

2. Классификация ИК по интенсивности помех и методам адаптации

Не рассматривая помехи с точки зрения их физической сущности как сигналы, приведем краткую классификацию потоков импульсных случайных помех по критерию их интенсивности, определяемой как $i_{pn}=f_{pn}/f_c$ (f_{pn} и f_c — частоты импульсной случайной помехи и кода, соответственно; индексы: *pn* — ***p**ulse **n**oise*; *c* — ***c**ode*). По классификации, предложенной Р.И. Юргенсоном [6], ИК в зависимости от интенсивности помех в КС могут функционировать в условиях действия помех малой ($i_{pn}<<1$), средней ($i_{pn}=1\div2$) и большой ($i_{pn}\geq3$) интенсивности. Учитывая это, в теории помехоустойчивого кодирования разработаны специфические для каждой классификационной группы методы обеспечения помехоустойчивости, позволяющие гарантировать показатели достоверности приема в ИК и в целом в ЦСПИ различного функционального назначения, соответствующие требованиям стандартов.

При синтезе многоканальных сетевых систем, распределенных по большой территории, или ИК с протяженным КС возникает проблема парирования негативных факторов, вызываемых нестационарностью каналов. Это определяет необходимость оптимизировать функционирование ИК в условиях конкретных канальных параметров и характеристик с учетом их неконтролируемых изменений. Основным критерием оптимизации является критерий достаточности обеспечения достоверности приема с точки зрения показателей исходов приема. Как правило, такими показателями являются вероятности p_{cr}, p_{fr} и p_{pf} соответственно, правильного, ложного приемов и защитного отказа (индексы: *cr* — ***c**orrect **r**eception*; *fr* — ***f**alse **r**eception*; *pf* — ***p**rotective **f**ailure*).

Очевидно, можно обеспечить необходимый уровень достоверности приема, ориентируясь на наихудшие с точки зрения помеховой обстановки канальные условия. Например, считать, что все каналы работают только в условиях действия помех большой интенсивности, однако такой вариант оказывается самым не экономичным, так как требует сложных многокаскадных кодовых форматов и, следовательно, не просто реализуемых аппаратно-программных КУ и ДКУ. Поэтому целесообразным является вариант использования адаптивных режимов функционирования, учитывающих специфику каналов, в частности статистику помех в КС. Более того, так как неконтролируемые изменения состояния КС характеризуются случайными временными параметрами, требуется реализация адаптивного динамического управления ИК [7, 8].

В теории кодирования рассматривается три вида адаптации каналов: ИК с адаптивным кодированием, с адаптивным декодированием, с адаптивным кодированием и декодированием. В ИК с адаптивным кодированием (декодированием) при изменении состояния канала меняется

метод кодирования (декодирования) — в узком или в широком смысле — за счет перестройки КУ (ДКУ). При этом алгоритмы декодирования (кодирования) и принципы построения ДКУ (КУ) остаются неизменными. В ИК с адаптивным кодированием и декодированием при изменении состояния канала меняются методы и алгоритмы и кодирования, и декодирования на основе перестройки и КУ, и ДКУ. В общем случае синтез систем с адаптивным динамическим управлением предполагает наличие обратной связи, что, несомненно, ведет к усложнению структур ИК и ЦСПИ, снижению их быстродействия и увеличению затрат на их реализацию.

Рассмотрим особенности адаптации ИК в зависимости от интенсивности канальных помех. При этом имеются в виду только методы активной помехоустойчивости, позволяющие обеспечить исправление ошибок, возникающих в КС, и не затрагиваются методы обеспечения пассивной помехоустойчивости, позволяющие лишь обнаруживать ошибки без возможности их коррекции.

3. Методы обеспечения помехоустойчивости ИК в условиях действия помех малой интенсивности

В случае помех малой интенсивности основным методом обеспечения помехоустойчивости является дублирование передачи, характеризующееся в общем случае многократным повторением передаваемых сообщений. Дублирование позволяет значительно снизить вероятность неправильного приема информации и обеспечить нормальную работу ИК в условиях действия помех.

В целом, если вероятность $p_{wr}(1)$ неправильного приема (индекс: *wr* —***w****rong* ***r****eception*) одного сообщения равна $p_{wr}(1)=p_{wr0}$, то при отсутствии корреляционной зависимости передаваемых сообщений и помех в КС a-кратное дублирование передачи сообщения характеризуется вероятностью $p_{wr}(a)$ неправильного приема:

$$p_{wr}(a)=[p_{wr}(1)]^a=(p_{wr0})^a \qquad (1)$$

Так как для подавляющего числа ИК $p_{wr0}<<1$ (в худшем случае $p_{wr0}<1$), то с учетом (1) справедливо неравенство:

$$p_{wr}(a)=(p_{wr0})^a<<p_{wr}(1)=p_{wr0}<<1. \qquad (2)$$

В соответствии с неравенством (2) для вероятностей $p_{cr}(1)$ и $p_{cr}(a)$ правильного приема одного сообщения и a сообщений, соответственно, справедливо соотношение:

$$p_{cr}(a)=[1-p_{wr}(a)]=[1-(p_{wr0})^a]>>p_{cr}(1)=[1-p_{wr}(1)]=(1-p_{wr0}). \qquad (3)$$

Как следует из (3), дублирование передачи ведет к существенному росту вероятности правильного приема, т.е. к повышению достоверности приема.

В настоящее время наибольшее распространение получили варианты дублирования на заданное число повторений, до прихода квитирующей посылки, по запросу. Дублирование на заданное число повторений используется в ИК одностороннего действия, когда в отсутствии обратной связи осуществляется последовательная во времени передача сообщений в КС заранее заданное число раз, что автоматически реализуется устройством a-кратного дублирования в составе КУ на передающей стороне ИК. Строго говоря, этот вид дублирования не относится к адаптивному управлению.

Дублирование до прихода квитирующей посылки осуществляется при наличии обратной связи в виде обратного КС. В этом случае устройство неограниченного повторения передачи в составе КУ в прямом канале обеспечивает передачу сообщений до тех пор, пока они не будут декодированы на приемной стороне в ДКУ прямого канала и пока устройство автоматического квитирования в этом ДКУ не выдаст в обратный канал соответствующее сообщение. Это сообщение, называемое квитанционной посылкой, по обратному каналу поступает на устройство неограниченного повторения передачи в КУ прямого канала и отключает его, завершая процесс дублирования. Этот вариант дублирования может быть отнесен к варианту адаптивного управления в зависимости от состояния прямого канала.

Дублирование по запросу также требует наличия обратного канала. Устройство однократной выдачи сообщения в составе КУ прямого канала обеспечивает выдачу сообщения и

переходит в режим ожидания. Устройство автоматического запроса в составе ДКУ прямого канала формирует сигнал запроса на повтор передачи сообщения в случае фиксации в ДКУ защитного отказа (не приема сообщения). Этот сигнал запроса поступает по обратному каналу в устройство однократной передачи сообщения в КУ прямого канала, включает его, обеспечивая повторную передачу. Этот вариант дублирования также может быть отнесен к варианту адаптивного управления в зависимости от состояния прямого канала.

Обратный канал в рассмотренных вариантах дублирования принято условно считать каналом без помех, учитывая, что квитанционная посылка и сигнал запроса, как правило, представляют собой мощный короткий импульс или короткий и мощный высоко помехоустойчивый кодовый сигнал.

К дублированию часто условно относят принцип дополнения передаваемых кодов. Этот принцип тоже требует наличия обратного канала. Как и в предыдущем случае, устройство однократной передачи сообщения в составе КУ прямого канала организует выдачу в канал кодовой посылки с определенным заранее установленным числом импульсов. Устройство автоматического дополнения в составе ДКУ прямого канала формирует кодовую посылку с числом импульсов, дополняющим принятое число импульсов до заранее установленного фиксированного числа, являющегося контрольным числом импульсов. Эта посылка дополнительного числа импульсов по обратному каналу поступает в устройство сверки в составе КУ прямого канала. Если контрольное число импульсов нарушено, включается устройство однократной передачи сообщения в КУ и осуществляется повторная передача сообщения. Этот принцип также относится к адаптивному управлению по состоянию канала.

Более подробно вопросы построения ИК с использованием методов дублирования с так называемыми решающими и информационными обратными связями, включая сравнительные оценки вероятностей исходов приема при работе с кодами различной корректирующей способности, рассмотрены в [9–11].

4. Методы обеспечения помехоустойчивости ИК, работающих в условиях действия помех средней интенсивности

При средней интенсивности помех в КС основным методом обеспечения помехоустойчивости является применение корректирующих кодов, в частности обнаруживающих r-кратные и/или исправляющих s-кратные ошибки трансформации и исправляющих e-кратные ошибки стирания. Другими словами, в общем случае в качестве рабочих используются K-ичные кодовые множества $M=K^m$ кодовых слов длины n с числом m информационных и числом k контрольных разрядов при коэффициентах $R=k/n$ избыточности ($0<R<1$) со значениями $d_{min} \geq r + s + e + 1$ минимального кодового расстояния. Подробная классификация корректирующих кодов для каналов с различными возможными вариантами ошибок трансформации и/или стирания и формулы связи значений минимального кодового расстояния со значениями кратностей ошибок разного типа приведены в [12].

Следует заметить, что рассматриваются ИК с последовательным синхронным интерфейсом, использующие только принцип циклической синхронизации для обеспечения битовой или байтовой синхронизации (синхронно-синфазной работы) кодеков ИК. ИК с принципом шаговой синхронизации не используются, так как при этом принципе каждый элемент кодовой посылки выполняет одновременно информационные и синхронизирующие функции. Поэтому воздействие однократной помехи на элемент посылки вызывает двойную ошибку, связанную с искажением информации, а также с нарушением синхронизации, что ведет к нарушению нормальной работы ДКУ и ухудшению показателей достоверности приема информации.

Наибольшее распространение получили двоичные корректирующие коды ($K=2=\{0,1\}$) с $d_{min}=3$ и $d_{min}=4$, способные исправить однократную ошибку трансформации, а также с $d_{min}=5$ и $d_{min}=6$, исправляющие двукратные ошибки трансформации. Используются также троичные корректирующие коды ($K=3=\{0$, $K_Т=2\}$, $K_Т=\{1, 2\}$ — токовые сигнальные признаки) с $d_{min}=3$,

исправляющие однократную ошибку трансформации, но наиболее распространены троичные корректирующие коды без использования нулевого сигнального признака (K_T={1, 2}) с d_{min}=4, исправляющие однократную ошибку трансформации, и с d_{min}=6, исправляющие двукратные ошибки трансформации. По аналогии с троичными кодами иногда используются четверичные корректирующие коды (при повышенной информационной емкости и почти всегда с использованием частотного сигнального признака).

Все указанные коды могут быть рекомендованы к применению в ИК с адаптивным управлением.

Отдельно необходимо сказать об использовании специфических кодов с повторением каждого кодового элемента с помощью двух или более частотных каналов [6]. Один из таких кодов — код Вагнера. Основа этого кода, как правило, — троичный код без использования нуля. При этом с целью повышения помехоустойчивости каждый базовый токовый символ («1» и «2») представляется двухразрядным K_T-кодом с постоянным весом («1»→12, «2»→21), сумма значений символов которых равна нулю по модулю 3 (этот код замены можно рассматривать и как код на четность в смысле модуля 3). При этом формируется два частотных канала: первый канал — с использованием частот f_1 («1») и f_2 («2»), а второй канал — частот f_3 («1») и f_4 («2»). Важно отметить, что элементы кодового слова второго частотного канала формируются в последовательности номеров (n, n–1, …, 2, 1), обратной последовательности номеров (1, 2, …, n–1, n) элементов кодового слова первого частотного канала, и строго синхронно. Такая структура кода обеспечивает возможность нормального приема кодовых слов даже при уничтожении помехами любой половины элементов кодовых слов. Код Вагнера позволяет обнаруживать и исправлять большое число разнообразных ошибок, в том числе за счет построения ДКУ по алгоритму Элайеса-Юргенсона, позволяющего исправлять все ошибки трансформации токовых символов в нулевые символы.

Код Вагнера дает возможность синтеза ИК с адаптивным управлением при высокой помехоустойчивости. Главным недостатком применения кода Вагнера является достаточно большая сложность программно-аппаратных средств реализации кодеков, особенно ДКУ.

Еще одной особенностью применения корректирующих кодов является использование комбинированных кодов (например, кода Хемминга-Вагнера) и каскадных кодов, обеспечивающих высокую корректирующую способность при адаптивном управлении ИК.

5. Методы обеспечения помехоустойчивости ИК, работающих в условиях действия помех большой интенсивности

Основным и практически единственным методом обеспечения помехоустойчивости ИК при помехах большой интенсивности является метод использования вторичного, защитного кодирования. В этом случае кодирование осуществляется в две ступени. На первой ступени кодирования формируется так называемый первичный код (ПК). В общем случае ПК является K-ичным каскадным корректирующим кодом с кодеком (КУ ПК и ДКУ ПК), работающим на основе принципа циклической синхронизации. На второй ступени кодирования каждый элемент ПК кодируется вторичным кодом (ВК), который всегда строится на базе кодового сигнального признака (КСП) и представляет собой нелинейный двоичный код с постоянным весом. Кодек ВК (КУ ВК и ДКУ ВК) реализуется на базе многоотводных линий задержки (МЛЗ) и работает в режиме самосинхронизации, обеспечивающей автоматическую надежную синхронно-синфазную работу кодека.

Подробное исследование ИК, работающих в условиях действия помех большой интенсивности, включая принципы формирования ПК, характеристики и свойства ВК, синтез ВК, алгоритмы кодирования и декодирования ВК на основе МЛЗ, оценку достоверности приема в ИК с ВК на базе КСП, приведено в [13–17].

Использование предложенного метода позволяет реализовать адаптивное управление ИК при высоких показателях достоверности приема для различных типов помех в КС.

С учетом сказанного выше можно сделать вывод, что, используя методы обеспечения помехоустойчивости, характерные для условий действия помех различной интенсивности, может быть реализовано адаптивное управление ИК в зависимости от интенсивности помех в КС. Очевидно, что при известных априорных значениях интенсивности помех в конкретных КС достаточно просто организовать выбор и применение соответствующих методов, позволяющих оптимальным образом обеспечить требуемый уровень достоверности приема. Однако в условиях изменяющихся характеристик КС по интенсивности помех требуется постоянный мониторинг КС для получения информации о состоянии каналов, что существенно усложняет реализацию адаптивного управления ИК.

6. Математическая модель ИК с адаптивным кодированием

Вернемся к общей постановке задачи синтеза ИК с адаптивным управлением. Если говорить об адаптивном кодировании, то требуется исследование методов адаптивного кодирования, при которых автоматически и целенаправленно изменяются структурные, параметрические и алгоритмические характеристики используемых корректирующих кодов в зависимости от состояния КС. При этом необходимо решать следующие основные задачи [18]:

– определить качество КС;

– принять решение о выборе корректирующего кода, его параметрах и алгоритмах кодирования и декодирования (с учетом использования надежных принципов синхронизации), обеспечивающих заданные вероятности исходов приема при возможной минимальной избыточности кода;

– осуществить управление ИК, т. е. установить необходимые параметры кода в кодеках ИК.

Выбор типа управления зависит от целого ряда факторов, в первую очередь, от характера и степени канальных изменений. При незначительном изменении качества канала, в силу относительной простоты технической реализации, целесообразно управлять параметрами кода K, n и k, определяющими его избыточность и корректирующую способность. Важной характеристикой кода является его весовая структура. Однако управление параметрами кода не всегда гарантирует получение необходимого значения минимального кодового расстояния, определяющего типы корректирующих ошибок и их количество. К тому же, далеко не все корректирующие коды позволяют легко и в нужных пределах изменять свои параметры. Наилучшими с точки зрения управляемости являются алгебраические коды, особенно в их систематическом структурном варианте, достаточно просто реализуемые программным способом. При существенных вариациях канальных характеристик, когда параметрического управления для оптимизации кода и соответствующих процедур кодирования не достаточно, необходимо управление структурными и алгоритмическими характеристиками.

В ряде работ, например, в [19], рассматривается следующая математическая модель системы S_{AC} адаптивного кодирования (индекс: *AC —**A**daptive **C**oding*).

Пусть H_{CC} — совокупность характеристик КС (индекс: *CC — **C**ommunication **C**hannel*); N_S, N_P, N_A — совокупности структурных, параметрических и алгоритмических характеристик, соответственно, корректирующего кода $N_C=\{N_S, N_P, N_A\}$ (индексы: *C — **C**ode*; *S —**S**tructure*; *P — **P**arameter*; *A —**A**lgorithm*); C_{AC} — совокупность характеристик системы адаптации как системы автоматического управления, включая законы формирования управляющих воздействий; F_{AC} — целевая функция системы адаптации, которая выражается отклонением вероятности p_{cr} правильного приема сообщения от заданного значения p_{crsv} этой вероятности (индекс: *crsv — **c**orrect **r**eception — **s**et **v**alue*).

Таким образом, система адаптивного кодирования представляется в виде:

$$S_{AC} = S(H_{CC}, N_C=\{N_S, N_P, N_A\}, C_{AC}, F_{AC}) . \quad (4)$$

В соответствии с (4) задачей адаптивной системы является выбор структурно-параметрических и алгоритмических характеристик корректирующего кода $N_C=\{N_S, N_P, N_A\}$и

законов управления C_{AC}, обеспечивающих минимизацию целевой функции F_{AC} при заданных характеристиках канала связи H_{CC}.

Математически задача адаптивного кодирования формулируется и решается как задача условной многокритериальной целочисленной оптимизации целевой функции F_{AC}. Эффективность адаптивного кодирования оценивается либо повышением скорости V передачи информации для заданного значения вероятности p_{crsv} правильного приема сообщения

$$V=\{\max V,\ p_{cr}=p_{crsv}\}, \quad (5)$$

либо увеличением вероятности p_{cr} правильного приема сообщения при заданном значении постоянной скорости V_{sv} передачи информации

$$p_{cr}=\{max\ p_{cr}\ ,V = V_{sv}\} \quad (6)$$

по отношению к коду с постоянными параметрами.

Однако, на наш взгляд, у предложенной математической модели есть существенный недостаток, связанный с выбором целевой функции F_{AC}, зависящей от разности $p_{crsv}–p_{cr}$. Для большинства ЦСПИ и ИК различного функционального назначения, как правило, не стандартизируется значение вероятности правильного приема: требования и рекомендации стандартов относятся к значениям вероятностей ложного приема и защитного отказа, поэтому правильнее было бы трактовать целевую функцию, как зависящую от разности $p_{fr}–p_{frsv}$ значения вероятности ложного приема и ее заданного значения. Тем более, что именно ложный прием является наиболее критичным исходом для любой ЦСПИ. Учитывая это, формулы (5) и (6) должны быть записаны в следующем виде:

$$V=\{\max V,\ p_{fr} = p_{frsv}\}, \quad (7)$$

$$p_{fr}=\{min\ p_{fr}\ ,V = V_{sv}\}. \quad (8)$$

Другими словами, эффективность адаптивного кодирования должна оцениваться или повышением скорости V передачи информации для заданного значения вероятности p_{frsv} ложного приема сообщения, или уменьшением вероятности p_{fr} ложного приема сообщения при заданном значении постоянной скорости V_{sv} передачи информации.

Можно также в качестве целевой функции взять функцию, зависящую от разности $p_{wr}–p_{wrsv}$ вероятности неправильного приема и ее заданного значения. Вероятность неправильного приема и ее условно заданное значение могут быть записаны как суммы соответствующих вероятностей ложного приема и защитного отказа:

$$p_{wr}= p_{fr} +p_{pf} \quad (9)$$

$$p_{wrsv}= p_{frsv} +p_{pfsv}. \quad (10)$$

Для большинства ИК справедливо неравенство:

$$p_{pf} >> p_{fr}. \quad (11)$$

Так, в соответствии с ГОСТ 26.205-88 и ГОСТ Р МЭК 870-5-1-95 для команд телеуправления (самые жесткие требования) в системах второй категории по достоверности приема $p_{pf}/p_{fr}=10^3$ и $p_{pf}/p_{fr}=10^4$ в системах первой категории. Учитывая (11), выражения (9) и (10) можно записать в виде:

$$p_{wr}= p_{pf}, \quad (12)$$

$$p_{wrsv}= p_{pfsv}. \quad (13)$$

В соответствии с (12) и (13) зависимости (7) и (8) можно представить как:

$$V=\{\max V,\ p_{wr} = p_{pfsv}\}, \quad (14)$$

$$p_{wr}=\{\min p_{wr}\ ,V = V_{sv}\}. \quad (15)$$

Если же ИК работают в условиях действия помех средней и особенно большой интенсивности, то при использовании корректирующих кодов с большой исправляющей способностью (15) может быть записано в виде:

$$p_{pf}=\{\min p_{pf}\ ,V = V_{sv}\}. \quad (17)$$

Другими словами, для ИК с адаптивным управлением при высокой корректирующей способности кода по исправлению ошибок основным критерием адаптации может быть минимизация вероятности защитного отказа.

Один из наиболее эффективных способов решения этой задачи в условиях действия помех большой интенсивности состоит в формировании при защитном отказе в ДКУ ВК с КСП особого символа, аналогичного символу стирания в каналах с ошибками стирания, с последующим его гарантированным исправлением в ДКУ ПК, построенном в соответствии с алгоритмом Элайеса-Юргенсона.

7. Пример структуры адаптивного управления ИК с радиоканалом

Как уже было сказано выше, важную роль в ИК с адаптивным управлением играет система мониторинга КС. Рассмотрим в качестве примера структуру ИК с радиоканалом (рис. 1).

ИК построен по стандартной структуре, в соответствии с которой КС представляет собой радиоканал, а кодеки реализованы по двухступенной схеме. В передающем устройстве ИК КУ источника информации — первая ступень кодирования внутренним кодом, КУ канала — вторая ступень кодирования внешним кодом. В приемном устройстве ДКУ получателя информации — ДКУ внутреннего кода, ДКУ канала — ДКУ внешнего кода.

Адаптивное управление кодированием осуществляется управляющим устройством, воздействующим на КУ канала передающего устройства ИК. Управляющее устройство формирует сигналы управления на основе информации от устройства мониторинга канала, которое получает ту же информацию, что и приемное устройство ИК, но вместо ДКУ канала содержит анализатор.

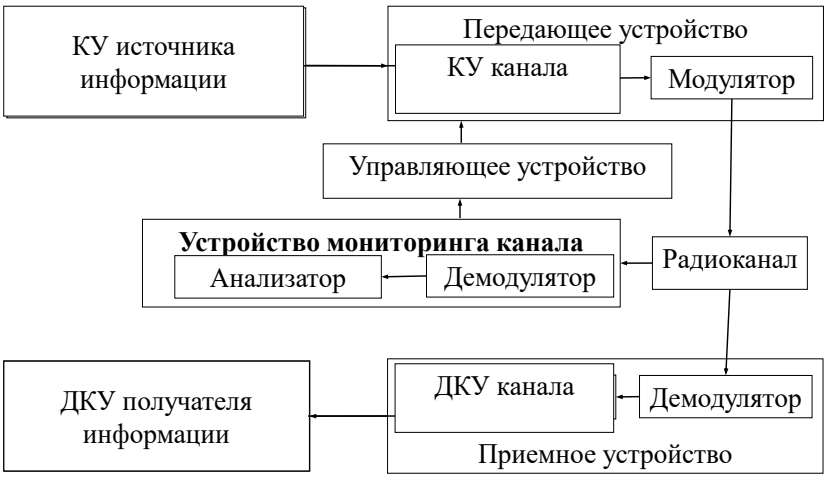


Рис.1. Структура ИК с радиоканалом

В общем случае это — анализатор искажений, который не только контролирует канальные сигналы, но также способен реагировать и на искажения сигналов блоков ИК. В этом смысле устройство мониторинга канала представляет собой универсальное диагностическое устройство.

ИК, построенный по такому принципу, был использован в одном из вариантов системы цифрового телерадиовещания, что дало возможность (при прочих равных условиях: информационной емкости, скорости передачи, кодовых форматов стандарта DVB-T2) обеспечить снижение вероятности ложного приема на два порядка [20].

Заключение.

Как показывает анализ, большинство современных ИК работают с использованием стандартных кодовых форматов, параметры и характеристики которых неизменны в процессе эксплуатации. К сожалению, такие ИК, не учитывающие нестационарность КС и происходящие в них случайным образом неконтролируемые изменения, в первую очередь, статистики помех различного типа, часто не обеспечивают требуемого уровня достоверности приема. Чаще всего еще на этапе проектирования ИК стремление обеспечить хорошие показатели по достоверности приема ведет к использованию мощных корректирующих кодов, требующих сложных в

реализации алгоритмов кодирования и декодирования и дорогостоящих программно-аппаратных средств.

Использование ИК с адаптивным динамическим управлением позволяет обеспечить структурную, параметрическую и алгоритмическую адаптацию, в частности процедур кодирования с целью оптимизации функционирования ИК в условиях неконтролируемых изменений канальных параметров и характеристик.

Эффективным видом адаптации ИК является автоматическое управление кодированием с использованием специфических методов обеспечения помехоустойчивости ИК при различной интенсивности помех.

В качестве критерия успешности адаптивного управления наиболее эффективным является критерий минимизации вероятности ложного приема, а в ряде случаев (при большой интенсивности помех) — критерий минимизации вероятности защитного отказа.

Синтез ИК с адаптивным динамическим управлением при их функционировании в условиях действия помех любой интенсивности и неконтролируемых изменениях статистики помех дает возможность достижения в среднем существенно лучших показателей по достоверности приема, что обеспечивает повышенную информационную надежность ИК.

Наиболее сложным и требующим эффективного решения остается вопрос мониторинга каналов. Этому посвящены другие работы авторов, например [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

14. Юргенсон, Р.И. Помехоустойчивость цифровых систем передачи телемеханической информации / Р. И. Юргенсон. – Л.: Энергия. –1971. – 250 с.

15. Bernard, S. Digital Communications: Fundamentals and Applications / S. Bernard. – Prentice Hall, 2001. – 1079 p.

16. Viterbi, A.J. Principles of digital communication and coding / A.J. Viterbi, J.K. Omura. – McGraw-Hill, 1979. – 584 p.

17. Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко. [и др.]. – М.: Радио и связь. 1986. – 304 с.

18. Финк, Л.М. Теория передачи дискретных сообщений / Л.М. Финк. – М.: Сов. радио, 1970. – 728 с.

19. Юргенсон, Р.И. Синтез кодирующих и декодирующих устройств телемеханики дискретного действия / Р. И. Юргенсон. – Л.: Изд-во Ленингр. электротехн. ин-та им. В. И. Ульянова (Ленина). – 1959. – 185 с.

20. Адаптивные алгоритмы компенсации помех / Д.Н. Ивлев [и др.]. – Н. Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского.– 2014.– 88 с.

21. Растригин, Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Растригин.– Рига: Зинатне.– 1981.–375 с.

22. Передача дискретных сообщений. Учебник для вузов /В. П. Шувалов [и др.].– М.: Радио и связь. – 1990. – 464 с.

23. Шварцман, В.О., Емельянов, Г.А. Теория передачи дискретной информации / В.О. Шварцман, Г.А. Емельянов.– М.: Связь. – 1979.– 424 с.

24. Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко [и др.]. – М.: Радио и связь. 1986. – 304 с.

25. Svetlov, M.S. Coding theory challenges: classic and modern / M.S. Svetlov. // Проблемы управления, передачи и обработки информации: сб. трудов VI Международной научной конференции, посвященной 85-летию Ю.А. Гагарина, СГТУ, декабрь 2018.– Саратов.– ООО «Студия оперативной полиграфии «Лоди».– 2019.– С.54–68.

26. Светлов, М.С. Повышение помехоустойчивости недвоичных информационных каналов с помехами большой интенсивности / М.С. Светлов [и др.]. // Радиотехника. — 2017. — №7. — С. 136–139.

27. Светлов, М.С. Анализ и оценка помехоустойчивости информационного канала с кодеком на базе кодового сигнального признака / М.С. Светлов [и др.]. // Радиотехника. — 2018. — №9. — С. 27–31. DOI: 10.18127/j00338486-201809-06.

28. Svetlov, M.S. Increasing of information reliability of digital communication channels under conditions of high intensity noise / Svetlov, M.S. [et. al.] // Dynamics of systems, mechanisms and machines (Dynamics-2016): Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference. — Omsk, 2016. IEEE Catalog Number: CFP16RAB-CDR. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819025.

29. Svetlov, M.S. Algorithms of coding and decoding for code with code signal feature / M.S. Svetlov [et. al.] // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus-2017): Proc. 2017 IEEE Conference. — St. Petersburg, 2017. — P. 748–752. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910666.

30. Svetlov, M.S. Synthesis of the information channel with codec based on code signal feature / M.S. Svetlov [et. al. // Information and Communication Technologies for Industry and Research (ICIT-2019): Proc. International Conference. — Saratov, 2019. — P. 199–214. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_18.

31. Советов, Б. Я., Стах, В. М. Построение адаптивных систем передачи информации для автоматизированного управления / Б. Я. Советов, В.М. Стах.– Л.: «Энергоиздат». – 1982. – 120 с.

32. Квашенников Методы адаптивного помехоустойчивого кодирования и их применение в перспективных комплексах авиационной радиосвязи / В. В. Квашенников [и др.]. // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». – ИРЭ РАН, 26–30 октября 2009.– М.:Изд-во ФГУП «Калужский НИИ телемеханических устройств».– 2009.– С.474–486.

33. Svetlov, M.S. Noise immunity improvement of DVB-T2 digital data transmission systems / M.S. Svetlov [et. al.] // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus-2018): Proc. 2018 IEEE Conference. — St. Petersburg, 2018. — P. 1162–1166. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317297.

34. Svetlov, M.S. Information channel synthesis for remote test monitoring / M.S. Svetlov [et. al.] // Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2018): Proc. International Conference. — Saratov, 2018. — P. 101–104. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542266.

DOI: 10.23683/978-5-9275-3228-5-2019-578-589

Дробынин Михаил Евгеньевич (1), Львов Петр Алексеевич (2),Ивженко Сергей Петрович (1), Ясюк Никита Александрович (1),Светлова Элла Михайловна (2), Шпрехер Марина Иосифовна (2)

1. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
2. Энгельсское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА РАБОТУ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Аннотация. *В настоящее время пьезорезистивные (ПР) датчики давления (ДД) широко применяются в различных микроэлектронных устройствах. Поведение электрического сигнала таких ДД в основном зависит от температуры окружающей среды. В работе рассмотрены различные факторы, влияющие на температурный дрейф исследуемого ДД: температурный эффект, зависимость сопротивления чувствительного элемента (ЧЭ) от концентрации примесей, зависимость модуля Юнга от температуры и др. На основе анализа математических моделей, описывающих отдельные температурные эффекты, построена и проверена на экспериментальных данных аналитическая калибровочная модель выходного сигнала ДД. Приведены выражения для корректировки показаний ДД при измерениях давления в широких температурных пределах.*

Ключевые слова: *датчик, интеллектуальный прибор, микроэлектромеханический датчик, давление, температура.*

Annotation. *Presently, piezoresistive pressure sensors (PS) are highly demanded for using in various microelectronic devices. The electrical behavior of these PS is mainly dependent on the temperature gradient. In this paper, various factors, which includes effect of temperature, doping concentration on the PS resistance, package stress, and temperature on the Young's modulus etc., are responsible for the temperature drift of the PS are analyzed. Basing on the mathematical models that describe the named temperature effects, an analytical calibration model of the output voltage of the sensor is proposed and the experimental data is validated. The expressions for correction of probe's data readings when measuring the pressure in the wide temperature range.*

Keywords: *sensor, smart transmitter, MEMS, pressure, temperature.*

1. Введение.

В результате развития производства микроэлектронной техники микроэлектромеханические (МЭМ) ДД все шире используются в измерительном процессе [1–9]. Их достоинства: простота использования, небольшие размеры, низкая стоимость и высокая надежность. Недостатком данного вида ДД является зависимость выходного сигнала от температуры, что вызвано температурным дрейфом, включая дрейф нуля, и изменением чувствительности ДД, обусловленной существенной зависимостью полупроводниковых приборов от температуры [1, 3, 6–9].

Выравнивание температурных коэффициентов сопротивления каждого из плеч моста Уитстона, служащего формирователем сигнала ДД, — сложная техническая задача. Во время работы ДД резисторы моста, чувствительные к изменению температуры, выделяют тепло. Из-за различной чувствительности резисторов плеч моста возникает неравномерное распределение температуры внутри ДД. Чувствительность ДД зависит от температурных коэффициентов, которые, в свою очередь, зависимы от температуры. В то же время связь чувствительности с температурным коэффициентом зависит от концентрации примесей, возникающей в процессе

производства ПР, образующих мост, что может оказывать сильное влияние на температурный дрейф чувствительности. Температурный дрейф ДД во многом ограничивает точность измерения и сферу их применения. Для большей температурной стабильности ДД необходимо использовать процедуры температурной компенсации. В работе рассмотрены некоторые ключевые факторы, влияющие на температурный дрейф: эффект температуры и зависимость сопротивления ЧЭ от концентрации примесей, зависимость модуля Юнга от температуры и т.д. На основе данного анализа построена модель выходного сигнала ДД.

2.Факторы, влияющие на температурный дрейф

2.1. Эффект температуры и влияние концентрации примесей на сопротивление резисторов ДД. Известно, что зависимость сопротивления резисторов от температуры T выражается формулой [1]:

$$R(T) = R(T_0)\left[1+\alpha(T-T_0)+\beta(T-T_0)^2\right] \quad (1)$$

где $R(T_0)$ — значение сопротивления при начальной температуре T_0; α и β — температурные коэффициенты при линейном и квадратичном членах, соответственно. Для полупроводникового образца чувствительного резистора длины L, с площадью поперечного сечения S и удельным коэффициентом сопротивления ρ значение сопротивления определится как $R = \rho L/S$.

Используя (1), можно получить [1, 10]:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\left[\frac{R(T)-R(T_0)}{R(T_0)}\right] = \alpha(T-T_0)+\beta(T-T_0)^2$$

Электрическое сопротивление полупроводника p-типа равно $\rho = 1/(q\mu_p p)$, где q – единица заряда; μ_p — мобильность переносчиков заряда; p — концентрация примесей. Температурные коэффициенты α и β являются функциями концентрации примесей и могут быть записаны в виде [10]:

$$\alpha(p) = A_\alpha + B_\alpha \log(p) + C_\alpha \log^2(p) + D_\alpha \log^3(p) + E_\alpha \log^4(p) \quad (2)$$

$$\beta(p) = A_\beta + B_\beta \log(p) + C_\beta \log^2(p) + D_\beta \log^3(p) + E_\beta \log^4(p) \quad (3)$$

где A, B, C, D, E с индексами α и β — постоянные коэффициенты. Подставляя уравнения (2) и (3) в (1), имеем:

$$\begin{aligned} R(T) = R(T_0)\Big\{1+\left[A_\alpha + B_\alpha \log(p) + C_\alpha \log^2(p) + D_\alpha \log^3(p) + E_\alpha \log^4(p)\right](T-T_0)+ \\ +\left[A_\beta + B_\beta \log(p) + C_\beta \log^2(p) + D_\beta \log^3(p) + E_\beta \log^4(p)\right](T-T_0)^2\Big\} \end{aligned} \quad (4)$$

Если температура равна T и на ДД не действует никакое внешнее избыточное давление, то изменение выходного сигнала ΔV_0 мостовой схемы в зависимости от питающего мост напряжения V_i и сопротивлений плеч моста как функций температуры может быть выражено [11]:

$$\Delta V_0 = V_i\left[\frac{R_4(T)}{R_1(T)+R_4(T)} - \frac{R_4(T_0)}{R_1(T_0)+R_4(T_0)} + \frac{R_3(T)}{R_2(T)+R_3(T)} - \frac{R_3(T_0)}{R_2(T_0)+R_3(T_0)}\right] \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5), получим:

$$\begin{aligned} \Delta V_0 = V_i\Bigg\{&\frac{R_1(T_0)R_4(T_0)}{\left[R_1(T_0)+R_4(T_0)\right]^2}\left[(\alpha_4-\alpha_1)T+(\beta_4-\beta_1)T^2\right]- \\ &-\frac{R_2(T_0)R_3(T_0)}{\left[R_2(T_0)+R_3(T_0)\right]^2}\left[(\alpha_3-\alpha_2)T+(\beta_3-\beta_2)T^2\right]\Bigg\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где индексы параметров α и β соответствуют номерам плеч моста.

Из уравнения (6) видно, что соотношение между выходным сигналом ДД и температурой представляет собой разность двух парабол.

2.2. Характеристики сопротивлений чувствительных резисторов ДД. В случае, когда избыточное давление *P* действует на ДД, изменение сопротивления кремния *p*-типа может быть найдено как [12]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2}\left(\sigma_l - \sigma_t\right) \tag{7}$$

где: π_{44} — продольный ПР коэффициент; σ_l и σ_t — напряжения в продольном и поперечном направлениях, соответственно; $\sigma_l = v\sigma_t$. Согласно исследованиям, максимальное напряжение σ_l в средней точке крайнего ребра квадратной кремниевой мембраны может быть выражено [11, 12] как $\sigma_l = \beta_1 \alpha^2 P / t^2$, где *t* — ее толщина.

При температуре *T* и концентрации примесей *N* продольный ПР коэффициент может быть вычислен из [13]:

$$\pi_{44} = \frac{300}{T\left[1+\exp\left(-E_F/k_BT\right)\right]\ln\left[1+\exp\left(-E_F/k_BT\right)\right]}\pi(300\text{K})$$

где E_F — энергия Ферми; k_B — постоянная Больцмана; π(300K) — величина ПР коэффициента при температуре 300 K.

2.3. Напряжение корпуса датчика. При изменении температуры напряжение термической деформации герметизирующего клея, возникающее в корпусе ДД, также оказывает влияние на сопротивление ДД, что обусловлено различием между коэффициентами термического расширения материалов, из которых изготавливаются корпус, заполняющий его композит и сам ДД. В таком случае уравнение (7) под воздействием напряжения корпуса может быть расширено:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\pi_{44}}{2}\left[\left(\sigma_l - \sigma_t\right) + \left(\sigma_{rl} - \sigma_{rt}\right)\right]$$

где σ_{rl}, σ_{rt} — продольное и поперечное напряжения, вызванные напряжением корпуса, соответственно. Согласно исследованиям, напряжение корпуса ДД равно [14]:

$$\sigma_r = \frac{E_Y}{1-v_P}\left(\alpha_f - \alpha_s\right)\Delta T$$

В уравнении (8) α_f, α_s — коэффициенты температурного расширения кремниевой тонкой мембраны и материала подложки, соответственно; ΔT — изменение температуры; E_Y — модуль Юнга кремния; v_P — коэффициент Пуассона.

2.4. Влияние температуры на модуль Юнга. Как известно, модуль Юнга — физический параметр, описывающий способность материала к сопротивлению растяжению, сжатию или упругой деформации. Для монокристального кремния модуль Юнга является функцией направления кристалла в направлении {110}. Для кремния наибольший модуль Юнга — в направлении {110}, а наименьший — в направлении {100}. В работе [15] показано, что модуль Юнга для кремниевой мембраны достаточно слабо зависит от температуры. В диапазоне температур 0÷500 K модуль Юнга может быть аппроксимирован линейной зависимостью $E_Y = h_1 T + h_2$ (h_1 и h_2 — постоянные коэффициенты).

2.5. Модель зависимости выходного сигнала моста от температуры. Предположим, что при опорной температуре T_0 = 273,15 K и давлении P_0 = 0 ГПа, сопротивление каждого из плеч моста равно R_0. Следовательно, при температуре *T* (пока напряжение корпуса ДД не учитывается), при давлении P_0 значение сопротивления из уравнения (1) может быть выражено как:

$$R(T) = R_0 + \Delta R(T) = R_0\left[1 + \alpha\left(T - T_0\right) + \beta\left(T - T_0\right)^2\right] \tag{9}$$

При температуре T и давлении P, если изменение сопротивления под влиянием температуры не учитывается, уравнение (9) может быть записано:

$$R(T,P) = R_0 + \Delta R\left[\pi_{44}(T), P\right] = R_0\left\{1+\frac{\pi_{44}}{2}(1-\nu)\left[\frac{\beta_1\alpha_2}{t^2}P + \frac{h_1T+h_2}{1-\nu_P}(\alpha_f-\alpha_s)(T-T_0)\right]\right\}$$

Значения сопротивлений R_1, R_2, соответственно, левого и правого полумостов ДД могут быть выражены как:

$$R_1(T) = R_{10} + \Delta R_1(T);\quad R_2(T,P) = R_{20} + \Delta R_2\left[\pi_{44}(T), P\right].$$

Как видно, изменения выходных напряжений V_{01} и V_{02} для левого и правого полумостов, соответственно, равны:

$$\Delta V_{01} = V_i\left[\frac{R_4(T,P)}{R_1(T)+R_4(T,P)} - \frac{R_{40}}{R_{10}+R_{40}}\right];\quad \Delta V_{02} = V_i\left[\frac{R_3(T,P)}{R_3(T)+R_2(T,P)} - \frac{R_{30}}{R_{20}+R_{30}}\right]. \qquad (10)$$

Тогда выходное напряжение ДД может быть найдено как:

$$V_0 = V_{01} - V_{02} = \Delta V_{01} - \Delta V_{02} + V_i\frac{R_{20}R_{40} - R_{10}R_{30}}{(R_{10}+R_{40})(R_{20}+R_{30})} \qquad (11)$$

Подставляя уравнения (10) в (11) и вводя для упрощения выражений следующие обозначения:

$$q_1 = \frac{R_{10}R_{40}}{(R_{10}+R_{40})^2},\qquad q_2 = \frac{R_{20}R_{30}}{(R_{20}+R_{30})^2},\qquad k_0 = q_1 + q_2,$$

$$k_1 = k_0\frac{150\beta_1\alpha^2\pi(300)V_i}{t^2},\quad k_2 = k_0\cdot 150 s_2(\alpha_f-\alpha_s)\pi(300)V_iT_0,$$

$$k_3 = k_0\cdot 150 s_2(\alpha_f-\alpha_s)\pi(300)V_iT_0,\quad k_4 = k_0\cdot 150 s_1(\alpha_f-\alpha_s)\pi(300)V_iT_0$$

$$k_5 = \left\{q_1(\alpha_4-\alpha_1) + q_2(\alpha_3-\alpha_2) - 2\left[q_1(\beta_4-\beta_1)+q_2(\beta_3-\beta_2)\right]T_0\right\}V_i,$$

$$k_6 = \left[q_1(\beta_4-\beta_1)+q_2(\beta_3-\beta_2)\right]V_i,$$

$$k_7 = \left\{\frac{R_{20}R_{40}-R_{10}R_{30}}{(R_{10}+R_{40})(R_{20}+R_{30})} - \left[q_1(\alpha_4-\alpha_1)+q_2(\alpha_3-\alpha_2)\right]T_0 - \left[q_1(\beta_4-\beta_1)+q_2(\beta_3-\beta_2)\right]T_0^2\right\}V_i,$$

$$q_0 = T\left[1+\exp\left(-E_F/k_BT\right)\right]\ln\left[1+\exp\left(-E_F/k_BT\right)\right],$$

выражение для выходного сигнала мостовой схемы можно записать в виде:

$$V_0 = \frac{1}{q_0}(k_1+k_2+k_3+k_4) + T(k_5+k_6) + k_7 \qquad (12)$$

Возможные методы компенсации температурной погрешности ДД подробно рассмотрены в работах [16–20], и существует возможность устранить погрешности измерения, характерные для мостовой схемы [7, 8, 21–24], но публикации по реализации подобных методов пока авторам не известны.

2.6. Экспериментальное подтверждение используемых моделей. Используя экспериментальные данные, полученные с помощью ДД типа ДД-М, выпускаемого ЭОКБ «Сигнал им. А.И. Глухарева» (г. Энгельс, Саратовская обл.), были построены рабочие характеристики ДД при различных температурах. На рис. 1 показана часть этих характеристик для температур из диапазона от –30 до +40°C. Как видно, в указанном диапазоне температур выходной сигнал ДД практически линейно зависит от приложенного давления. На рис. 2 показаны кривые выходного сигнала того же ДД в зависимости от температуры при различных давлениях. На основании снятых данных были определены калибровочные коэффициенты k_1, …,

k_7 модели (12) (таблица 1). Для всех точек калибровки давления ошибка калибровки ДД составляет менее ±0,25 Па при значениях давления менее 10^4 ГПа.

Таблица 1. Экспериментальные значения калибровочных констант

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
34,726	426487,897	-28559,754	-406,603	75,861	-0,018	23960,159

2.7. Описание датчика. Новейшим из МЭМ ПР ДД, разработанных и произведенных в ЭОКБ «Сигнал», является ДД ДД-М, предназначенный для измерения абсолютного или относительного давления от 10^5 до 10^7 Па (от 1 до 100 бар) [30]. Материалом, использованным для его изготовления, является двусторонний полированный монокристалл кремния *n*-типа с удельным сопротивлением от 3 до 5 Ом/см. Четыре ПР *p*-типа, сформированные диффузией бора на поверхности диафрагмы датчика, образуют мост Уитстона. Два ПР находятся в радиальном направлении и два других — в поперечном направлении рядом с краем диафрагмы. Диафрагма представляет собой квадрат площадью 1,08 мм^2. Толщина диафрагмы составляет от 32 до 160 мкм, в зависимости от номинального интервала измеряемых давлений. Положение ПР оптимизировано для каждой толщины диафрагмы с целью получения наибольшей возможной линейности выходного сигнала. После производства пластина крепится анодированием к стеклянной подложке. Чтобы сделать ДД пригодным для промышленного применения и с целью обеспечения оптимальных условий функционирования ЧЭ, должен быть использован специальный корпус. Помещенный в такой корпус ЧЭ, по сути, и есть ДД. Он представляет собой мост Уитстона, составленный из резисторов, величины сопротивлений которых зависят от давления. Мост запитан постоянным током I_0. Этот ток создает напряжение V_{out} на выходе датчика и V_{br} на входе возбуждения.

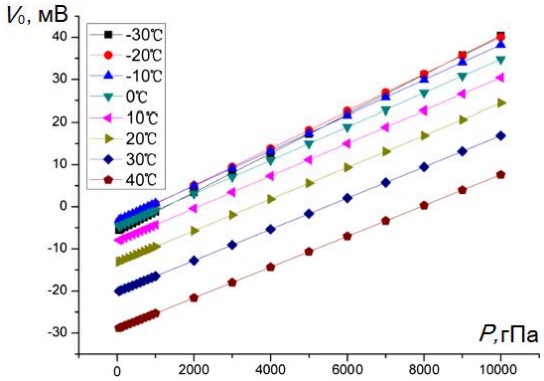


Рис. 1. Рабочие характеристики ДД ДД-М при различных температурах

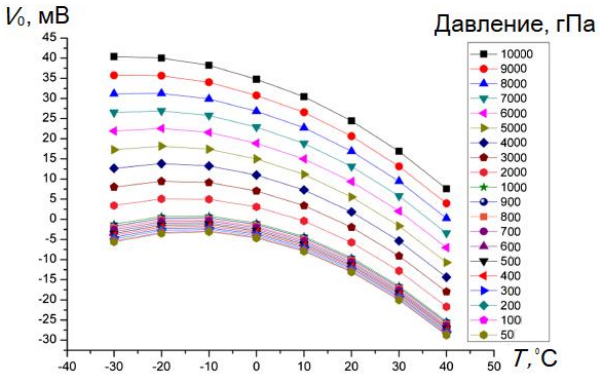


Рис. 2. Температурные характеристики ДД ДД-М при различных давлениях

3. Калибровочные математические модели датчика

При разработке метода одновременного измерения давления и температуры с использованием единственного ДД были экспериментально определены характеристики ДД ДД-М. Главной целью являлось определение зависимости между двумя выходными параметрами датчика $R_{out} = V_{out}/I_0$ и $R_{br} = V_{br}/I_0$ для измеряемых температуры и давления. Упрощенная блок-схема макета измерительной установки приведена на рис.3.

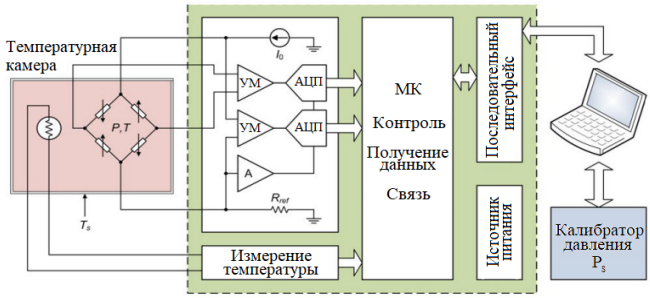


Рис.3. Блок-схема экспериментальной установки

Она состоит из высокопроизводительного автоматического калибратора давления, температурной камеры, модуля получения сигнала и персонального компьютера. Одновременно разработано программное приложение для решения трех основных задач: обеспечение связи с модулем получения сигнала и калибратором давления, создание пользовательского интерфейса для индикации результатов измерения и инструментального контроля и хранение данных. ДД размещается внутри температурной камеры. Высокопроизводительный ПР датчик температуры (ДТ) *Pt*-100 (погрешность не более ±0,06°C) прикреплен к поверхности ДД. Измерение происходит при 20 различных значениях температуры с шагом 10°C (от 130 до 60°C), начиная от самой высокой температуры для исключения конденсации воды во время эксперимента.

Номинальный интервал измерения ДД делится на 10 равных частей. Получаются 11 равноотстоящих используемых значений давления.

Давление в экспериментах изменялось от наименьшего значения до наивысшего, а затем в обратном направлении, поэтому может наблюдаться эффект гистерезиса. В каждой точке измерения регистрируются: давление P(бар), полученное с калибратора, заданное значение температуры камеры T_S (°C) и температуры тестируемого ДД T (°C), а также измеренные значения сопротивлений выходов R_{out} и R_{br} ДД.

Результатом эксперимента является набор из 220 точек с измеренными данными, полученными в течение восьми часов. Измеренное давление определяется по формуле:

$$\hat{P}\left(R_{out}, R_{br}\right) = a_0 + a_1 R_{out}\left(P, T_{ref}\right)$$

где a_0 и a_1 — параметры, рассчитанные по методу наименьших квадратов (МНК) для экспериментальных данных, полученных при $T = T_{ref} = 20$°C [38, 39]. Относительная погрешность измеренного давления в i-й точке выражается в процентах от полной шкалы измерения:

$$\delta P_i\left[\%FS\right] = \frac{\hat{P}\left(R_{out\,i}, R_{br\,i}\right) - P_i}{\left|P_{\max} - P_{\min}\right|} \cdot 100\%, \quad i = \overline{1, N}, \qquad (13)$$

где N=220 — общее число точек, в которых проводятся измерения; $P_{\max}$= 100 бар и $P_{\min}$= 0 бар — максимальное и минимальное значения исследуемого интервала измерения давления, соответственно; *FS* – обозначение полной шкалы (*Full Scale*). За индикатор показателя качества тестируемого ДД при измерении давления был взят параметр $\overline{\delta P} \pm U_P$, где $\overline{\delta P}$ — средняя относительная погрешность; U_P — расширенная неопределенность измерения, соответствующая интервалу в два стандартных отклонения [40]:

$$\overline{\delta P} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \delta P_i, \quad U_P = 2\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{P}_i - P_i\right)^2}\,\frac{100}{\left|P_{\max} - P_{\min}\right|}.$$

Это позволяет получить информативную характеристику в виде разности измеренного и установленного на калибраторе значений давления.

Аналогичный подход используется для измерения температуры. Она находится из выражения:

$$\hat{T}\left(R_{out}, R_{br}\right) = b_0 + b_1 R_{br}\left(P_{ref}\right),$$

где b_0 и b_1 — параметры, рассчитанные по МНК для экспериментальных данных, полученных при $P = P_{ref} = 0$ бар относительно атмосферного давления. Абсолютная погрешность измерения температуры для i-й точки находится:

$$\Delta T_i\left[^{\circ}C\right] = \hat{T}\left(R_{out\,i}, R_{br\,i}\right) - T_i, \quad i = \overline{1, N}. \tag{14}$$

Индикатор показателя качества тестируемого ДД при измерении температуры выбран аналогично измерению давления $\overline{\Delta T} \pm U_T$, где $\overline{\Delta T}$ — среднее значение абсолютной погрешности, а U_T — расширенная неопределенность измерения, соответствующая интервалу в два стандартных отклонения [40]:

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta T_i, \quad U_P = 2\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{P}_i - P_i\right)}\,\frac{100}{\left|P_{\max} - P_{\min}\right|}.$$

В таблице 2 приведены результаты измерений тестируемого ДД (столбец «Без температурной коррекции»). Текущая температура, измеренная с помощью ДТ *Pt*-100, считается истинной, и погрешности характеризуются как абсолютные отклонения от этого значения.

Таблица 2. Измерения давления и температуры $T_{\max}$ = 70 °C, m = 4, n =4, u = 2, v = 4

	Без температурной коррекции	С температурной коррекцией	
		первым способом	вторым способом
$\overline{\delta P} \pm U_P$ [% FS]	0,052±0,979	–0,001±0,25	–0,001±0,15
$\overline{\Delta T} \pm U_T$ [° C]	3,222±8,520	0,010±0,6	0,010±0,2

Результаты подтверждают, что приемлемый уровень точности измерения ДД не может достигаться без должной корректировки выходных данных. Метод корректировки, представленный далее, основывается на математической модели ДД и компьютерном алгоритме, позволяющем осуществлять одновременное измерение давления и температуры в реальном времени.

4. Корректировка показаний ДД

На основе экспериментально полученных данных была построена параметрическая математическая модель кремниевого ПР МЭМ ДД, учитывающая влияние давления и температуры на его выходной сигнал.

В данном случае целью является определение калибровочных кривых ДД как зависимостей измеряемых величин давления и температуры от выходных параметров R_{out} и R_{br} ДД. Были использованы два метода градуировки ДД. Сначала выбрана модель, состоящая из двумерных полиномов:

$$\hat{P}\left(R_{out}, R_{br}\right) = \sum_{j=0}^{m}\sum_{k=0}^{n} d_{ik} R_{out}^{j} R_{br}^{k} \tag{15}$$

$$\hat{T}\left(R_{out}, R_{br}\right) = \sum_{j=0}^{u}\sum_{k=0}^{v} g_{ik} R_{out}^{j} R_{br}^{k} \tag{16}$$

где $\hat{P}$ и $\hat{T}$ — измерения давления и температуры, соответственно; d_{ik} и g_{ik} —калибровочные параметры тестируемого ДД, подлежащие оценке; m, n, u, v — порядки полиномов (15) и (16),

задаваемые так, чтобы сохранить точность математической модели, но с учетом вычислительной мощности используемого промышленного компьютера. В результате исследований выбраны следующие значения порядков: $m = 4$, $n = 4$, $u = 2$, $v = 4$. Параметры d_{ik} вычисляются аппроксимацией функции (15) с использованием МНК по экспериментальным данным (P_i, $R_{out\,i}$, $R_{br\,i}$, $i = \overline{1,220}$). Таким образом, получаются математические модели каждого тестируемого ДД и калибровочные кривые для коррекции измерений давления и температуры.

Далее в ходе исследования была предложена более простая в вычислительном отношении методика построения калибровочных кривых, подробно описанная в [41, 42]. Согласно этой методике сначала строится полином, характеризующий выходной сигнал мостовой схемы в зависимости от приложенного давления, температуры и входного сигнала мостовой схемы. Сначала находились зависимости выходного сигнала от приложенного давления для различных значений температуры из всего рабочего диапазона. На основании экспериментальных данных можно аппроксимировать характеристику $u = h(P)$ ДД полиномом некоторой степени M:

$$u = h(P) = \sum_{i=0}^{M} q_i P^j \ , \qquad (17)$$

где коэффициенты полинома q_j($j = \overline{1,M}$) являются функциями температуры $q_j = w_j(T)$. Зависимость каждого коэффициента q_j от температуры определяется тоже в виде полинома:

$$q_j = w_j(T) = \sum_{m=0}^{K} v_{mj} T^m \ , \qquad (18)$$

где K — порядок модели; v_{mj} — коэффициенты регрессии, оценки которых вычисляются по МНК и заносятся в микропроцессор интеллектуального ДД.

Такой подход позволяет упростить расчет коэффициентов модели по МНК, так как требует расчета матриц плана эксперимента существенно меньших размерностей по сравнению с подходом, описанным ранее.

5. Обсуждение результатов

С целью экспериментального подтверждения работоспособности предложенного метода было использовано интеллектуальное промышленное устройство, разработанное в ЭОКБ «Сигнал», в которое был установлен заранее протестированный ДД. Упрощенная блок-схема приведена на рис.4.

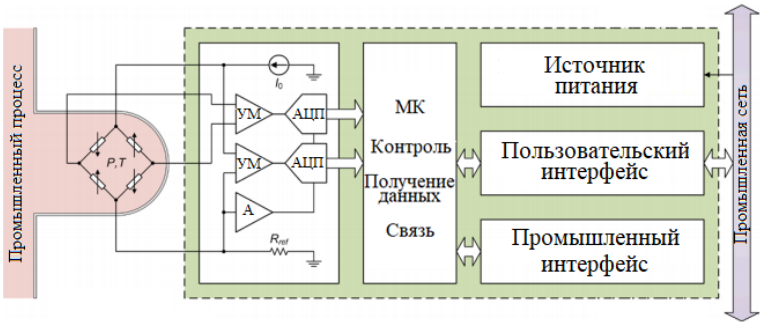


Рис. 4. Упрощенная блок-схема интеллектуального промышленного устройства одновременного измерения давления и температуры

В целом она повторяет блок-схему измерительной системы для снятия параметров ДД (рис.3), но имеет два важных отличия: отсутствует отдельный ДТ, а микроконтроллерный блок осуществляет всю обработку данных (включая корректировку ДД) и выполняет функцию контроля и связи с использованием промышленного интерфейса. Установка выполняет коррекцию ДД в реальном времени путем вычисления (15) и (16) (для первого способа) или (17) и (18) (для второго способа) с каждым набором получаемых с выходов данных и одновременным получением значений R_{out} и R_{br}. Для этого параметры d_{ik} и g_{ik} (первый способ) или M, K и v_{mj} (второй способ) для данного ДД должны быть сохранены в постоянной памяти установки либо в

памяти самого ДД [41, 42]. Измерения проводятся в таком же порядке, как в случае с измерением параметров ДД, но измерения давления и температуры для каждого измеряемого значения сохраняются. Относительные погрешности измерения давления, полученные с использованием выражения (7), представлены на рис. 5. Абсолютные погрешности измерения температуры, выраженные в градусах Цельсия, согласно выражению (17), показаны на рис. 6. Сравнивая полученные результаты (таблица 2), можно сделать вывод, что метод позволяет увеличить точность измерений температуры и давления. Относительная неопределенность измерения давления уменьшилась в 3,9 раза, а температурная — в 14,2 раза при первом способе коррекции и, соответственно, в 6,5 и 42,6 раза при втором способе коррекции. Так как предлагаемый метод измерения предназначается для использования в промышленности, главным критерием применимости является достижимая точность измерения по сравнению с другими существующими методами, применяемыми в отечественной индустрии. В случае измерения давления современные промышленные ДД обычно имеют относительную неопределенность в 0,125% полной шкалы или выше, в зависимости от диапазона температур. Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что такой уровень производительности может быть превзойден с использованием предложенного метода измерения, по крайней мере, для рассматриваемого диапазона температур (от –60°C до 120°C). Измерения температуры в промышленных процессах обычно проводятся с использованием температурных щупов, основанных на термопарах или резистивных датчиках температуры. Наиболее часто используются термопары, которые могут достигать точности в ±1,5°C в температурном диапазоне от –40°C до 375°C [43]. Однако температурный диапазон ЧЭ ДД-М ограничен физическими показателями кремния и не превосходит 160°C. Предлагаемая методика оценки температуры не уступает в точности этим показателям, но не требует установки специального ДТ, что существенно упрощает и удешевляет ДД.

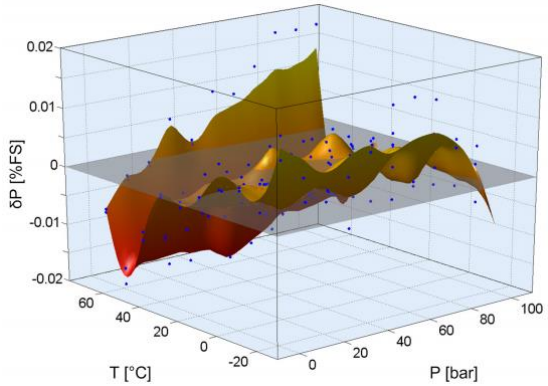


Рис. 5. Относительные погрешности измерения давления как функции давления и температуры

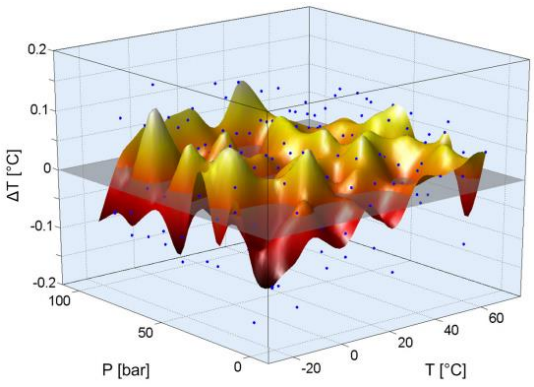


Рис. 6. Абсолютные погрешности измерения температуры как функции давления и температуры

Заключение

В ходе работы была тщательно изучена зависимость температурного дрейфа ДД от различных параметров. Характеристики ДД ДД-М были подтверждены экспериментально при исследовании зависимости его выходного сигнала от входных параметров давления и температуры. Была построена и проверена аналитическая модель температурной компенсации для такого ДД. Модель была протестирована с помощью экспериментальных данных, полученных для макетного образца ДД ДД-М. Вычислены значения его калибровочных констант.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Датчики измерительных систем: в 2 кн. / Ж. Эш [и др.]. – М.: Мир, 1992. – Кн. 1. – 480 с.

2. Boukabache, A. Doping effects on thermal behaviour of silicon resistor / A. Boukabache, R. Pons // Electronics Letters. – 2002. – № 38(7). – P. 342–343.

3. Temperature effects modeling in silicon piezoresistive pressure sensor / U. Aljancic, D. Resnik, D. Vrtacnik et al. // Proc. 11-th Mediterranean Electrotechnical Conf., MELECON. – Cairo, Egypt, 2002. – P. 36–40.

4. Повышение точности емкостных датчиков давления для авиакосмической техники / С.А. Кузин, П.А. Львов, А.А. Львов, М.С. Светлов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3(188). – С. 29-42.

5. Коновалов, Р.С. Повышение точности пьезорезистивных датчиков давления / Р.С. Коновалов, П.А. Львов, А.А. Львов // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. / Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 149-158.

6. Львов, А.А. Малогабаритные датчики давления на основе кремниевых поликристаличесиких структур с диэлектрической изоляцией / А.А. Львов, Р.С. Коновалов // Датчики и системы. –2015. – № 8 (195). – С. 29-32.

7. L'vov, A. 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 // Proc. 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia, 2016. – P. 279-282.

8. Коновалов, Р.С. Повышение точности высокотемпературных емкостных датчиков абсолютного давления / Р.С. Коновалов, П.А. Львов, А.А. Львов // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. / Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 136-142.

9. Львов, А.А. Высокотемпературные датчики давления / А.А. Львов, Р.С. Коновалов // Надежность и качество: тр. Междунар. симп.: в 2-х т. – Пенза, ПГУ, 2014. – Т. 2. – С. 48 -50.

10. Mohamed, R.L. Influence of temperature on the offset voltage of piezoresistive pressure sensors / R.L. Mohamed, C. Abdelhafid // Int. Conf. on Computational Methods in Science and Engineering. – Corfu, GREECE, 2007. – P. 25-30.

11. Nie, M. The analytical calibration model of temperature effects on a silicon piezoresistive pressure sensor / M. Nie, Y. Gao // AIP Advances. – 2017. – № 7. – P. 111-117.

12. Fraga, M.A. An Overview on the Modeling of Silicon Piezoresistive Pressure Microsensors / M.A. Fraga, L.L. Koberstein // 2012 Workshop on Engineering Applications (WEA). – Bogota, Columbia, 2012. – P. 1–6.

13. Yozo, K. A graphical representation of the piezoresistance the coefficients in silicon / K. Yozo // IEEE Trans. on Electron Device. – 1982. – No. 29(1). – P. 64–70.

14. Chiou, J.A. Pressure nonlinearity of micromachined piezoresistive pressure sensors with thin diaphragms under high residual stresses / J.A. Chiou, S. Chen // Sensors and Actuators: Ser. A – Physical. – 2008. – No. 147(1). –P. 332–339.

15. Effect of temperature on the Young's modulus of silicon nano-films / Y.Y. Tan, Y.U. Hong, Q.A. Huang, T.Q. Liu // Chinese J. of Electron Devices. – 2007. – No. 30(3). – P. 755–758.

16. Gureyev, V.V. High accuracy semiautomatic calibration of industrial RTDs / V.V. Gureyev, A.A. L'vov // Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., IMTC 2007. – Warsaw, Poland, 2007. – P. 1-6.

17. Метод компенсации ошибки измерения сопротивления резистивных датчиков температуры в токовой петле / А.А. Шевченко, В.В. Гуреев, В.А. Пыльский, А.А. Львов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – № 2(43). – С. 45-49.

18. Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления / А.Ю. Николаенко, А.А. Львов, П.А. Львов и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 4(77). – С. 154-160.

19. Николаенко, А.Ю. Компенсация температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления / А.Ю. Николаенко, А.А. Львов, П.А. Львов // Надежность и качество: тр. Междунар. симп.: в 2-х т. – Пенза, ПГУ, 2014. – Т. 2. – С.57-59.

20. Применение формирователя сигнала параметрических датчиков «токовая петля» для измерения температуры / А.А. Львов, В.В. Гуреев, В.А. Пыльский, А.А. Шевченко // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 4(50). – С.17-20.

21. L'vov, A.A. Improvement of the Current Loop Circuit for AC and DC Applications Based on Digital Signal Processing / A.A. L'vov, V.V. Gureev, V.A. Pylskiy // Proc. IEEE Instrum. Meas. Technology Conf. Sorrento, Italy: IEEE, 2006. – P. 1257-1261.

22. L'vov, A.A. Optimal Digital Signal Processing for Current Loop Circuit / A.A. L'vov, V.A. Pylskiy // Digest of the IEEE Conf. on Precision Electromagnetic Meas. Torino, Italy: IEEE, 2006. – P. 1054-1060.

23. Львов, А.А. Анализ моделей метода наименьших квадратов и методов получения оценок / А.А. Львов, М.В. Мусатов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – № 4(43). – С.137-141.

24. 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 // Proc. X Int. Sci. Tech. Conf. «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)». – Omsk: Omsk State Technical University, 2016. – P. 1-5.

25. Analysis of the competitive adsorption and mass transfer influence on equilibrium mass fluctuations in affinity-based biosensors / M. Frantlović, I. Jokić, Z. Djurić, K. Radulović // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2013. – № 189. – P. 71–79.

26. Повышение точности емкостных датчиков давления для авиакосмической техники / С.А. Кузин, П.А. Львов, А.А. Львов, М.С. Светлов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3(188). – С. 29-42.

27. Коновалов, Р.С. Повышение точности высокотемпературных емкостных датчиков абсолютного давления / Р.С. Коновалов, П.А. Львов, А.А. Львов // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. – Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 136-142.

28. Коновалов, Р.С. Повышение точности пьезорезистивных датчиков давления / Р.С. Коновалов, П.А. Львов, А.А. Львов // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. / Саратов: Издат. дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 149-158.

29. Test Methods and Results of the MEMS Inertial Sensors / E.N. Scripal, R,V. Ermakov, A.A. L'vov et al. // Proc. 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia, 2018. – P. 1000-1003.

30. Львов, А.А. Малогабаритные датчики давления на основе кремниевых поликристалическиких структур с диэлектрической изоляцией / А.А. Львов, Р.С. Коновалов // Датчики и системы. – 2015. – № 8 (195). – С. 29-32.

14. 31.Львов, А.А. Высокотемпературные датчики давления / А.А. Львов, Р.С. Коновалов // Надежность и качество: тр. Междунар. симп.: в 2 т. – Пенза, Пензенский государственный университет, 2014. – Т. 2. – С. 48 -50.

31. Temperature measurement using silicon piezoresistive MEMS pressure sensors / M. Frantlović, I. Jokić, Ž. Lazićet et al. // Proc. 29th Int. Conf. on Microelectronics MIEL. – Belgrade, Serbia: IEEE, 2014. – P. 159–161.

32. Self-Calibration and Optimal Response in Intelligent Sensors Design Based on Artificial Neural Networks / Rivera, J., Carrillo, M., Chacón et al. // Sensors. – 2007. – № 7. – P. 1509-1529.

35. Gureyev, V.V. High accuracy semiautomatic calibration of industrial RTDs / V.V. Gureyev, A.A. L'vov // Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., IMTC 2007. – Warsaw, Poland, 2007. – P. 31-36.

36. IEC 60584-1:2013. Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances. Int. Standard, Ed. 3. – 136 p.

37. Simultaneous measurement of temperature and pressure by a single fiber Bragg grating with a broadened reflection spectrum / T. Guo, X.G Qiao, Z.N. Jia, Q.D. Zhao, X.Y. Dong, 2006. – P. 2935–2939.

38. Doelle, M.B. Temperature Extraction from a Pressure Sensor. - US Patent No. 8,082,796 B1 Silicon Microstructures Inc., USA, 2011.

39. Мусатов, М.В. Анализ моделей метода наименьших квадратов и методов получения оценок / М.В. Мусатов, А.А. Львов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 4. – № 2 (43). – С. 137-140.

40. Метод компенсации ошибки измерения сопротивления резистивных датчиков температуры в токовой петле / А.А. Шевченко, В.В. Гуреев, В.А. Пыльский, А.А. Львов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – № 2(43). – С. 45-49.

41. Application of the Uncertainty Method for Analysis of Multi-Port Correlator Accuracy / N. Semezhev, A.A. L'vov, M.S. Svetlov [et al.] // Proceed. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia, 2017. – P. 1-5.

42. Методика компенсации температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления / А.Ю. Николаенко, А.А. Львов, П.А. Львов и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 4(77). – С. 154-160.

43. Николаенко, А.Ю. Компенсация температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления / А.Ю. Николаенко, А.А. Львов, П.А. Львов // Надежность и качество: тр. Междунар. симп.: в 2 т. – Пенза, ПГУ, 2014. – Т. 2. – С. 57-59.

44. L'vov, A. 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 // Proc. 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia, 2016. – P. 279-282.

Научное издание

Сборник научных трудов

IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»

Подписано в печать 16.09.2019 г.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Формат 60×84 1/8.
Усл. печ. лист. 63,01. Уч. изд. л. 23,00. Заказ № 7211.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.

590